



TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISIS *SPRINGBACK TUBE* SS 304L
BERPENAMPANG LINGKARAN DAN ELIPS PADA
PROSES *ROTARY DRAW BENDING***

RIFQI ZUFAR SAPUTRO

NRP. 2712 100 119

DOSEN PEMBIMBING

Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



FINAL PROJECT - TL 141584

**SPRINGBACK ANALYSIS OF CIRCULAR AND
ELLIPTICAL TUBE SS 304L IN ROTARY DRAW
BENDING PROCESS**

RIFQI ZUFAR SAPUTRO

NRP. 2712 100 119

LECTURER

Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

**ANALISIS *SPRINGBACK TUBE SS 304L*
BERPENAMPANG LINGKARAN DAN ELIPS PADA
*PROSES ROTARY DRAW BENDING***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RIFQI ZUFAR SAPUTRO

NRP. 2712 100 119

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc (Pembimbing 1)
2. Mas Irfan P. Hidayat, ST. M.Sc, Ph.D (Pembimbing 2)



**ANALISIS *SPRINGBACK TUBE SS 304L*
BERPENAMPANG LINGKARAN DAN ELIPS PADA
PROSES *ROTARY DRAW BENDING***

Nama : Rifqi Zufar Saputro
NRP : 2712100119
Jurusan : Teknik Material & Metalurgi
Dosen Pembimbing: Tubagus Noor Rohmannudin, S.T, M.Sc
Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Simulasi bending tube menggunakan metode elemen hingga telah banyak diterapkan di berbagai bidang termasuk untuk mengetahui besaran sudut springback pada proses rotary draw bending. Pada penelitian ini dilakukan simulasi bending tube untuk mengetahui pengaruh sudut bending, diameter tube, ketebalan dinding dan jenis penampang terhadap besaran sudut springback yang muncul setelah proses pelepasan gaya dilakukan. Proses analisa dan simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Release 15.0. Simulasi dilakukan dengan melakukan rotasi tube searah dengan perputaran yang dilakukan oleh bend die. Variasi tube yang digunakan adalah tube dengan outer diameter 30 mm, 40mm dan 50 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180°. Penelitian juga dilakukan untuk mengetahui besaran sudut springback pada tube berpenampang elips. Dari simulasi didapatkan sudut springback pada diameter 30 mm sebesar 0.865, 1.541, 2.137, 2.469, 2.744, dan 3.111. Pada diameter 40 mm didapat sudut springback sebesar 0.793, 1.398, 2.034, 2.458, 2.669, dan 2.979. Pada diameter 50 mm didapat sudut springback sebesar 0.739, 1.295, 1.885, 2.292, 2.601, dan 2.927.

Kata Kunci: *Analisa elemen hingga, springback, tube, rotary draw bending, advanced manufacture*

SPRINGBACK ANALYSIS OF CIRCULAR AND ELLIPTICAL TUBE SS 304L FOR ROTARY DRAW BENDING PROCESS

Name : Rifqi Zufar Saputro
NRP : 2712100119
Major : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T, M.Sc
Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Tube bending simulation using finite element method has been widely applied in various fields, including to determine the amount of springback angle on the rotary draw bending process. In this study, the simulation is conducted to determine the effect of tube bending angle, tube diameter, wall thickness tube and the type of cross-section of the magnitude of springback angle that appears after unloading occurs. Analysis and simulation is done using the software ANSYS Release 15.0. Simulations done by drawing the tube in the direction of rotation of the bend die. Tube variations used is tube with outer diameter of 30 mm, 40 mm and 50 mm with thickness of 3 mm at angles 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, and 180° and tube with outer diameter of 40 mm with thickness of 1 mm, 2 mm, 3 mm and 4 mm at an angle of 90°. Research was also conducted to determine the amount of springback angle on an elliptical tube. From the simulation, springback angle on a 30 mm diameter by 0865, 1,541, 2,137, 2,469, 2,744, and 3,111. At a diameter of 40 mm obtained springback angle of 0793, 1,398, 2,034, 2,458, 2,669, and 2,979. At a diameter of 50 mm obtained springback angle of 0739, 1,295, 1,885, 2,292, 2,601, and 2,927.

keywords: finite element analysis, springback, tube, rotary draw bending, advanced manufacture

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas berkah dan rahmat Allah SWT, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun Laporan Tugas Akhir yang berjudul : **Analisis *Springback Tube SS 304L Berpenampang Lingkaran Dan Elips Pada Proses Rotary Draw Bending***

Pada kesempatan kali ini Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan kedua adik Penulis atas semua dukungan moril dan materiil yang selalu dicurahkan.
2. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
3. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir.
4. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir.
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Teman-teman Penulis, mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS angkatan 2012 serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Penyusun menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan ini. Besar harapan penulis akan saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat.

Surabaya, Januari 2016

Penyusun

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
TITLE	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Rumusan Permasalahan	2
I.3. Batasan Masalah	3
I.4. Tujuan	3
I.5. Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1. Penelitian Sebelumnya Mengenai <i>Springback</i>	5
II.2. <i>Rotary Draw Bending</i>	10
II.2.1 <i>Clamp Die</i>	15
II.2.2 <i>Pressure Die</i>	15
II.2.3 <i>Bend Die</i>	15
II.2.4 <i>Wiper Die</i>	16
II.2.5 <i>Mandrel</i>	16
II.3 <i>Springback</i>	17
II.4 <i>Springback Pada Tube</i> Penampang Lingkaran.....	19
II.5. <i>Bending Moment</i> Pada Penampang Lingkaran dan Elips.....	22
II.5.1 <i>Bending Moment</i> Elips.....	22
II.5.2 <i>Bending Moment</i> Lingkaran.....	23
BAB III METODOLOGI	
III.1. Metode Penelitian.....	29
III.2. Spesifikasi Material dan Parameter <i>Bending</i>	30
III.2.1. Material <i>Tube</i>	30

III.2.2. Geometri <i>Tube</i>	30
III.2.3 <i>Rotary Draw Bending</i>	31
III.3. Peralatan	32
III.4. Proses Penelitian	32
III.5. <i>Meshing</i>	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1. Von Mises <i>Stress</i> Pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran	39
IV.1.1 <i>Tube</i> Lingkaran dengan Diameter 30 mm.....	39
IV.1.2 <i>Tube</i> Lingkaran dengan Diameter 40 mm.....	48
IV.1.3 <i>Tube</i> Lingkaran dengan Diameter 50 mm.....	57
IV.2 Von Mises <i>Stress</i> Pada <i>Tube</i> Berpenampang Elips.....	66
IV.3 Pengaruh Sudut <i>Bending</i> dan Geometri <i>Tube</i> terhadap Sudut <i>Springback</i> Pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran.....	75
IV.3.1 <i>Tube</i> Lingkaran Dengan Diameter 30 mm.....	75
IV.3.2 <i>Tube</i> Lingkaran Dengan Diameter 40 mm.....	82
IV.3.3 <i>Tube</i> Lingkaran Dengan Diameter 50 mm.....	88
IV.4 Pengaruh Sudut <i>Bending</i> terhadap Sudut <i>Springback</i> Pada <i>Tube</i> Berpenampang Elips.....	96
IV.5 Pengaruh Penampang terhadap Sudut <i>Springback</i> Pada <i>Tube</i>	103
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1. Kesimpulan.....	109
V.2. Saran.....	109
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Efek dari <i>Bending</i> Radius dan Material pada <i>Springback</i> (Murata, 2008).....	6
Gambar 2.2 Proses <i>Rotary Draw Bending</i> (Paulsen, 1996).....	7
Gambar 2.3 Pengaruh Modulus Elastisitas terhadap Sudut <i>Springback</i> (Zhan, 2014).....	8
Gambar 2.4 <i>Sketch of Springback of Thin-Walled Tube NC Bending</i> (Gu, 2008).....	10
Gambar 2.5 Peralatan yang Digunakan Pada <i>Rotary Draw Bending</i> (Miller, 2003).....	11
Gambar 2.6 Arah Rotasi dari <i>Rotary Draw Bending</i> (Miller, 2003).....	12
Gambar 2.7 Gaya pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran (Khodayari, 2008).....	13
Gambar 2.8 Gaya yang Bekerja pada <i>Tube</i> Berpenampang Elips (Gardner, 2011).	14
Gambar 2.9. <i>Free Body Diagram of Rotary Draw Bending</i> (Yang, 2010).....	14
Gambar 2.10 Bagian Alat dari <i>Rotary Draw Bending</i> (Miller, 2003).....	16
Gambar 2.11 <i>Steel Ball Mandrel</i> (Miller, 2003).....	17
Gambar 2.12 <i>Springback</i> setelah <i>Unloading</i> (Thorat, 2015)	18
Gambar 2.13 Fenomena of Elastic Strain Recovery (Callister, 2007).....	18
Gambar 2.14 Efek <i>Springback</i> setelah Pelepasan Beban (Thorat, 2015).....	19
Gambar 2.15 Area dari <i>Tube</i> (Zhang, 2016).....	22
Gambar 2.16 Area pada Penampang Elips (Ashby, 2005).....	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 <i>Rotary Draw Bending</i> Penampang Lingkaran	32
Gambar 3.3 <i>Rotary Draw Bending</i> Penampang Elips.....	32
Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan Menggunakan Metode Elemen Hingga..	33

Gambar 4.1 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	40
Gambar 4.2 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	41
Gambar 4.3 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	43
Gambar 4.4 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	44
Gambar 4.5 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	46
Gambar 4.6 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	48
Gambar 4.7 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	49
Gambar 4.8 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	50
Gambar 4.9 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	52
Gambar 4.10 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	53
Gambar 4.11 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	55

Gambar 4.12 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	57
Gambar 4.13 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	58
Gambar 4.14 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	59
Gambar 4.15 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	60
Gambar 4.16 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	62
Gambar 4.17 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	63
Gambar 4.18 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	65
Gambar 4.19 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Elips dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	67
Gambar 4.20 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Elips dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	68
Gambar 4.21 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Elips dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	69
Gambar 4.22 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube Berpenampang</i> Elips dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	71

Gambar 4.23 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Elips dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	73
Gambar 4.24 <i>Von Mises Stress</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Elips dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	74
Gambar 4.25 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 30 derajat	76
Gambar 4.26 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 60 derajat	76
Gambar 4.27 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 90 derajat	77
Gambar 4.28 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 120 derajat <i>scanning</i>	78
Gambar 4.29 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 150 derajat.	79
Gambar 4.30 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 180 derajat	80
Gambar 4.31 Grafik Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm.	81
Gambar 4.32 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 30 derajat.	82
Gambar 4.33 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 60 derajat.	83
Gambar 4.34 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 90 derajat	84

Gambar 4.35 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 120 derajat	84
Gambar 4.36 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 150 derajat	85
Gambar 4.37 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 180 derajat	86
Gambar 4.38 Grafik Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm.	88
Gambar 4.39 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm dengan Sudut 30 derajat.	88
Gambar 4.40 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm dengan Sudut 60 derajat.	89
Gambar 4.41 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm dengan Sudut 90 derajat.	90
Gambar 4.42 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm dengan Sudut 120 derajat.	91
Gambar 4.43 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm dengan Sudut 150 derajat	92
Gambar 4.44 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm dengan Sudut 180 derajat.	93
Gambar 4.45 Grafik Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran Diameter 50 mm.	94
Gambar 4.46 Grafik Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm, 40 mm, dan 50 mm.	96

Gambar 4.47 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 30 derajat..... 97

Gambar 4.48 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 60 derajat..... 97

Gambar 4.49 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 90 derajat..... 98

Gambar 4.50 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 120 derajat..... 99

Gambar 4.51 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 150 derajat..... 100

Gambar 4.52 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 180 derajat..... 101

Gambar 4.53 Grafik Besar Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips..... 102

Gambar 4.54 Grafik Perbandingan Perhitungan Matematis Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dan *Tube* Berpenampang Elips..... 104

Gambar 4.55 Grafik Perbandingan Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dan *Tube* Berpenampang Elips.....105

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307)	29
Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L.....	30
Tabel 3.3 Geometri <i>Tube</i> Penampang Lingkaran	31
Tabel 3.4 Geometri <i>Tube</i> dengan Penampang Elips	31
Tabel 3.5 Parameter <i>Rotary Draw Bending</i>	32
Tabel 3.6 Variasi Pembebanan pada Percobaan	34
Tabel 3.7 Variasi Pembebanan Penampang Elips.....	35
Tabel 4.1 Kondisi Simulasi <i>Springback</i>	38
Tabel 4.2 Kondisi Simulasi <i>Springback</i> Penampang Elips.....	39
Tabel 4.3 Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm	81
Tabel 4.4 Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm	87
Tabel 4.5 Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm	94
Tabel 4.6 Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm, 40 mm dan 50 mm.....	95
Tabel 4.7 Besar Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Elips.....	102
Tabel 4.8 Perbandingan Perhitungan Matematis Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dan <i>Tube</i> Berpenampang Elips.....	103
Tabel 4.9 Perbandingan Simulasi Sudut <i>Springback</i> pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran dan <i>Tube</i> Berpenampang Elips	105
Tabel 4.10 Rasio ρ_o/ρ_f pada <i>Tube</i> Berpenampang Lingkaran... 106	
Tabel 4.11 Rasio ρ_o/ρ_f pada <i>Tube</i> Berpenampang Elips.....	107

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

I.1 Latar Belakang

Sebagai struktur ringan yang penting dan pengalir liquid atau sebagai komponen *heat exchangers*, logam tubular secara luas digunakan pada aplikasi kedirgantaraan, otomotif, industri minyak dan industri kimia (Wen, 2014). Logam tubular memiliki banyak kelebihan dari segi efisiensi, biaya, dan kualitas dengan membentuk logam tubular menggunakan teknologi pembentukan plastis. Dari banyak proses pembentukan ini yang paling umum digunakan adalah *bending*. Sampai saat ini sudah banyak metode bending yang dikembangkan. Banyaknya metode pembentukan ini dikarenakan permintaan yang berbeda dari segi spesifikasi *tube*, bentuk, material dan toleransi pembentukan. Jika dilihat dari efisiensi, kualitas dan kemampuannya untuk membuat logam tubular dengan bentuk kompleks, maka *rotary draw bending* merupakan metode yang paling tepat. *Rotary draw bending* digunakan oleh sebagian pelaku industri *tube bending* terutama industri *tube bending* yang menggunakan peralatan yang dapat dikontrol secara numerik (*Numerical Controlled Bending / NC Bending*).

Rotary draw bending adalah metode *bending* yang fleksibel dan digunakan oleh sebagian besar industri dikarenakan biaya yang murah. Pada proses, *tube* dijepit oleh *clamp die* dan *bend die*. *Bend die* mengalami rotasi dan menarik *tube* searah dengan gerak rotasi *bend die*. *Pressure die* mencegah *tube* agar tidak ikut berotasi dengan *bend die* dan *pressure die* biasanya berada dalam kondisi diam. Luasnya penggunaan metode ini mengakibatkan banyaknya penelitian yang dilakukan pada proses *rotary draw bending* dan sebagian besar penelitian tersebut fokus



pada analisis dari cacat/kegagalan, seleksi/optimasi dari parameter pembentukan, dan peralatan untuk membantu pengembangan ilmu dan teknologi dari *tube* bending dengan metode eksperimental, analitikal dan numerikal (Yang, 2012). Cacat umum yang biasa terjadi pada proses ini adalah *springback*.

Pada industri pembentukan logam plastis, *springback* menjadi masalah tersendiri dikarenakan perubahan bentuk yang tidak diinginkan setelah pelepasan gaya pembentuk yang dapat berakibat pada kualitas dan kesulitan *assembly* (Zhan, 2016). Saat logam *tube* mengalami proses *bending*, deformasi elastis-plastis akan muncul. Deformasi elastis akan mengalami *recovery* setelah pelepasan gaya atau terjadinya *springback*. Saat nilai *springback* melebihi toleransi, geometri tidak memenuhi syarat dan akan berakibat berkurangnya performansi dari *tube* tersebut. *Springback* yang muncul pada masing-masing tidak sama, dikarenakan perbedaan modulus elastisitas tiap material (Zhan, 2016). Oleh karena itu, penelitian mengenai analisis *springback* setelah *bending* mulai banyak dilakukan.

Teknik atau metode *tube rotary draw bending* yang ada saat ini masih terbatas terutama pada cetakan/*die*. *Die* yang ada hanya dapat digunakan untuk satu jenis ukuran diameter luar. Keseluruhan *die* harus diganti jika ukuran diameter luar berubah dan ini akan berakibat pada kenaikan biaya dan kurangnya efisiensi eksperimen. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode simulasi untuk menghindari kekurangan-kekurangan yang mungkin terjadi pada analisis eksperimental. Hasil dari simulasi yang muncul nantinya akan divalidasi dengan perhitungan matematis yang ada untuk mengetahui *springback* yang terjadi.

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan penjabaran latar belakang diatas dapat ditarik beberapa masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh penampang *tube* (lingkaran dan elips) terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending*?



2. Bagaimana pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending tube* berpenampang lingkaran?
3. Bagaimana pengaruh diameter *tube* terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending tube* berpenampang lingkaran?
4. Bagaimana pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending tube* berpenampang elips?

I.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang sesuai dengan referensi yang ada serta agar tidak menyimpang dari permasalahan yang akan ditinjau, maka terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhitungkan yaitu:

1. Material isotropik.
2. Material homogen.

I.4 Tujuan

Tujuan yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh geometri penampang pipa (lingkaran dan elips) terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending*
2. Menganalisis pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending tube* berpenampang lingkaran
3. Menganalisis pengaruh diameter *tube* terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending tube* berpenampang lingkaran
4. Menganalisis pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* pada proses *rotary draw bending tube* berpenampang elips



I.5 Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu sebagai referensi untuk peneliti – peneliti selanjutnya dalam menganalisa masalah mengenai *springback* yang terjadi pada proses *tube bending* dan sebagai rujukan untuk pengembangan dalam proses manufaktur lanjut.

BAB II

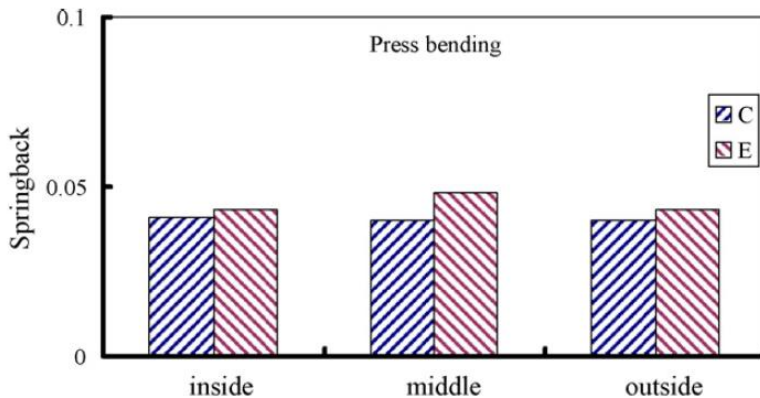
TINJAUAN PUSTAKA

Pada penelitian ini, proses *bending tube* dengan menggunakan proses *rotary draw bending* bertujuan untuk menekukkan pipa dengan sudut dan geometri tertentu untuk mengetahui sudut *springback* yang terjadi. Mekanisme dari proses *rotary draw bending* yang dilakukan akan dijelaskan pada Bab II di bawah.

II.1 Penelitian Sebelumnya Mengenai *Springback*

Dalam beberapa tahun terakhir terdapat sejumlah penelitian-penelitian mengenai proses *springback*.

Dengan menggunakan simulasi elemen hingga, (Murata, 2008) telah meneliti tentang *springback* pada pipa paduan aluminium dan pipa baja tahan karat pada proses *draw bending* dan *press bending*. Mereka menemukan bahwa pengaruh pengerasan hanya menghasilkan efek yang kecil pada *springback*. Mereka mencoba meneliti efek dari properti material yang mengalami proses pengerasan atau *hardening* pada proses *bending* pipa. Penelitian dilakukan dengan melihat radius *bending*, distribusi regangan, *springback*, dan *flatness* sebagai parameter yang diteliti dengan analisa menggunakan metode elemen hingga dan hasil eksperimen pada proses *press bending*. Hasil dari penelitian ini adalah mengenai efek dari properti material pipa, seperti *hardening exponent* n . efek dari eksponen pengerasan sudah sangat jelas pada penelitian mengenai *bending* pipa. Eksponen pengerasan dari n tidak memiliki efek terhadap fenomena *springback*, distribusi regangan ketebalan, dan rasio *flatness* pada dimensi pipa dengan radius *bending* yang sama.

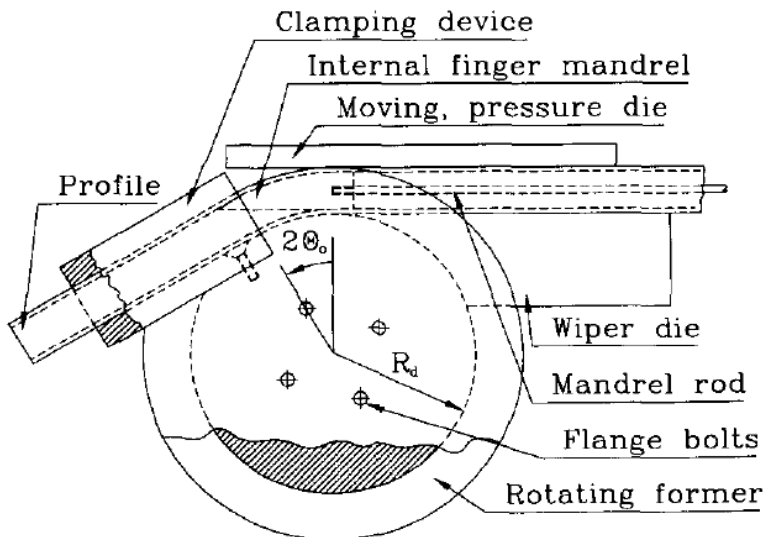


Gambar 2.1 Efek dari *Bending Radius* dan Material pada *Springback* (Murata, 2008)

Paulsen (1996) melakukan analisa elemen hingga tiga dimensi elastis-plastis dimana focusan analisa tersebut adalah pada proses *bending* paduan aluminium. Mereka menemukan bahwa *springback* dipengaruhi oleh karakteristik dari pengerasan regangan dan jumlah dari beban aksial, termasuk penurunan pengerasan regangan dan kenaikan tegangan yang mereduksi terjadi *springback*. Fokus utama dari penelitian ini adalah efek dari sifat material, *slenderness* dari penampang, dan geometri *die* berdasarkan geometri yang ada. Pengaruh lainnya adalah dengan memberikan eksternal *pre-stretching* dan penopang internal untuk mendapatkan toleransi yang lebih baik lagi. Hasil dari penelitian sudah divalidasi dengan beberapa kali pengtesan melalui laboratorium dan juga mesin *bending* yang ada di industry. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa *wrinkles* dapat dihindari dengan mengaplikasikan *mandrel* internal dengan kondisi statis. Dan juga dapat dilihat bahwa *pre-stretching* eksternal memiliki kelebihan tersendiri untuk mereduksi terjadinya *buckling* lokal dan *springback*. *Springback* elastis dipengaruhi oleh karakteristik *strain-hardening* dan jumlah beban aksial yang diterapkan, keduanya akan menurunkan *strain*



hardening dan menaikkan tegangan yang akan mereduksi kemungkinan terjadinya *springback*.

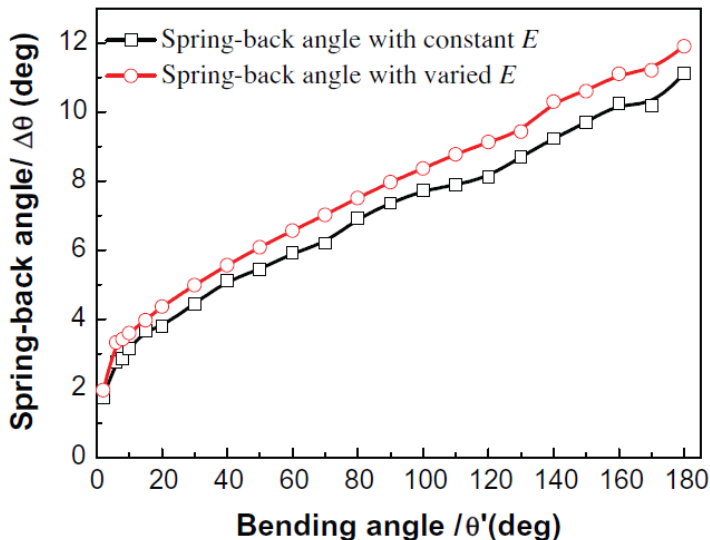


Gambar 2.2 Proses *Rotary Draw Bending* (Paulsen, 1996)

Zhan (2014) menemukan bahwa variasi Modulus Young tidak memiliki efek terhadap variasi dari sudut *springback* atau radius *springback* pada sudut *bending* dari pipa paduan titanium. Akan tetapi, variasi tersebut mengakibatkan kenaikan nilai. Modulus Young adalah salah satu parameter penting dari suatu material yang mempengaruhi kualitas pembentukan plastis dari komponen *bent*, terutama *springback*. Modulus Young mengalami perubahan seiring dengan regangan plastis, dan karakterisasi akurat diperlukan untuk meningkatkan keakuratan simulasi pada proses *bending* pipa dan memperoleh *bending* dengan akurasi *bent* yang tinggi dan stabil. Efek dari variasi Modulus Young pada *springback*, *flattening* pada penampang, dan penipisan dinding material pipa TA18-HS dengan control numeric adalah: 1) dengan adanya peningkatan regangan plastis,



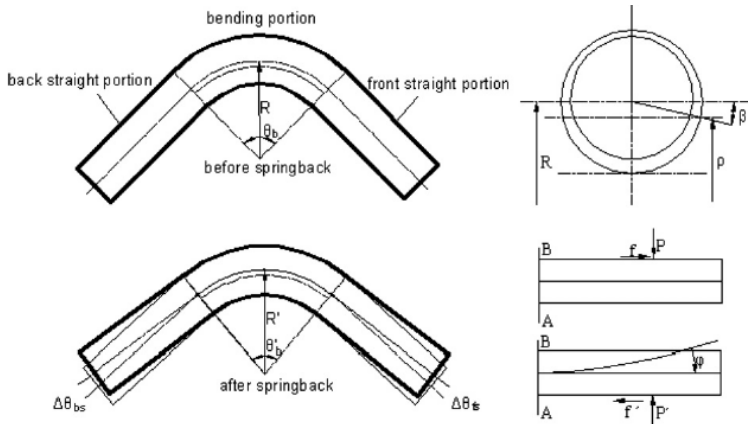
nilai dari Modulus Young akan berkurang secara cepat di awalnya, kemudian akan berkurang secara lambat dan akhirnya akan konstan pada nilai tertentu. Perilaku ini dapat dinyatakan sebagai fungsi eksponensial. 2) variasi Modulus Young tidak memiliki efek terhadap trend dari sudut *springback* atau radius *springback* dengan sudut *bending*, akan tetapi hal ini akan menyebabkan kenaikan nilai. 3) *flattening* dari penampang sebelum terjadi *springback* akan lebih besar dengan mempertimbangkan variasi Modulus Young dibandingkan jika variasi tersebut tidak diperhitungkan. *Flattening* dari penampang setelah terjadi *springback* akan lebih kecil dengan mempertimbangkan variasi dari Modulus Young. Dengan demikian *recovery* dari fenomena *flattening* penampang dengan mempertimbangkan variasi Modulus Young akan lebih besar jika dibandingkan dengan tidak mempertimbangkan variasi tersebut. 4) variasi dari Modulus Young memiliki efek terbatas terhadap proses penipisan dinding dari pipa.



Gambar 2.3 Pengaruh Modulus Elastisitas terhadap Sudut *Springback* (Zhan, 2014)



Gu (2008) menyusun sebuah model elemen hingga untuk proses *bending* dari pipa dinding tipis dengan material paduan aluminium yang dikontrol secara numeric dan memperoleh efek geometri, material dan parameter proses terhadap *springback*. Hasilnya menunjukkan bahwa sudut *springback* akan meningkat seiring dengan radius *bending* dan Poisson *ratio*. Keseluruhan proses dari *bending* yang dikontrol numeric mencakup tiga proses yaitu proses *bending* pipa, pengeluaran *mandrel*, dan *springback*. Berdasarkan pada simulasi numerik dari keseluruhan proses, mekaniske *springback* dan aturan *bending* pipa berdinding tipis akan terlihat. Pada saat terjadi *springback*, sudut dari *bending* akan menurun dan radius dari *bending* akan meningkat. Total sudut *springback* dengan mempertimbangkan proses pengeluaran mandrel akan lebih kecil dibandingkan dengan tidak dipertimbangkannya pengeluaran mandrel dan perbedaan maksimum keduanya yang ada pada penelitian adalah 107,34%. Proses pengeluaran *mandrel* harus dipertimbangkan untuk memprediksi secara akurat *springback* yang terjadi pada pipa berdinding tipis. Total sudut *springback* meningkatkan secara linear dengan meningkatnya sudut *bending* saat sudut *bending* tersebut besar. Radius *springback* dapat diperoleh berdasarkan panjang lapisan netral yang tidak berubah selama mekanisme *springback* berlangsung. Perubahan panjang *bending* saat *springback* berlangsung, biasanya sangat kecil sehingga dapat diabaikan ketika radius *springback* dihitung. Radius *springback* independen terhadap sudut *bending* dan peningkatan secara linear dari sudut *springback* dengan meningkatnya sudut *bending* dapat digunakan untuk menghitung radius dari *springback*.



Gambar 2.4 Sketch of Springback of Thin-Walled Tube NC Bending (Gu, 2008)

Zhan (2006) mengatakan bahwa *springback* memiliki pengaruh yang sangat penting terhadap kualitas dari *bending* pipa dinding tipis yang dikontrol secara numerik. Pada penelitian, Zhan (2006) menyusun metode analisa numerik untuk mekanisme *springback* dan aturan dari proses *bending* pipa. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa 1) terdapat dua penyebab terjadinya *springback*. Pertama adalah dari bagian kurva plastis pipa yang memiliki hubungan bilinear terhadap sudut *bending*. Yang kedua adalah dari bagian lurus yang bervariasi seperti garis eksponen dengan sudut *bending*. 2) berdasarkan penjelasan mengenai sudut *springback*, persamaan regresi antara sudut *springback* dan sudut *bending* dalam kondisi yang berbeda dapat diperoleh. 3) semakin besar faktor kekuatannya, atau semakin kecil radius *bending* relatif atau eksponen pengerasan, maka semakin besar sudut *springback*.

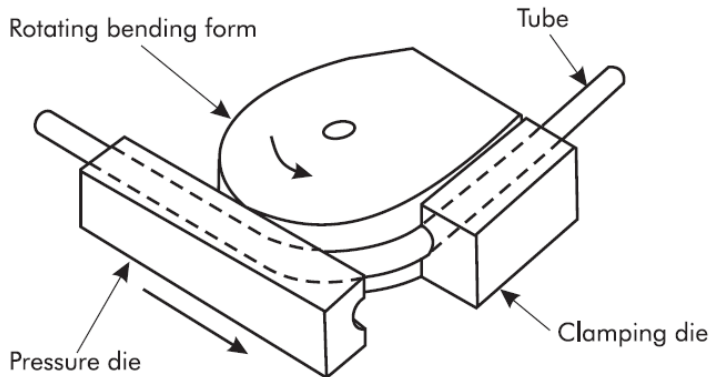
II.2 Rotary Draw Bending

Rotary draw bending merupakan metode yang paling umum digunakan pada mesin *bending* tipe rotary, dimana mesin



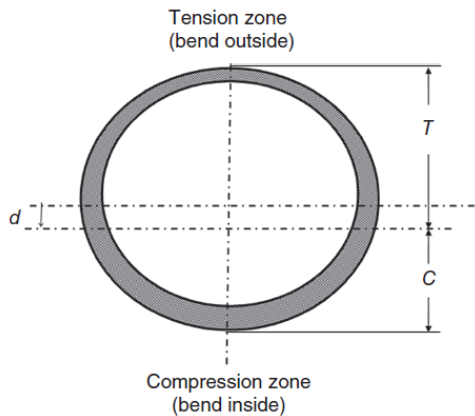
tube dilepas kemudian jepitan antara *clamp die* dan *bend die* dilepas untuk mengambil benda kerja yang telah mengalami proses *bending*.

(Miller, 2003)



Gambar 2.6 Arah Rotasi dari *Rotary Draw Bending* (Miller, 2003)

Pada *rotary draw bending* terdapat beberapa gaya yang terjadi pada proses *rotary draw bending*. Gaya-gaya tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7, Gambar 2.8 dan Gambar 2.9





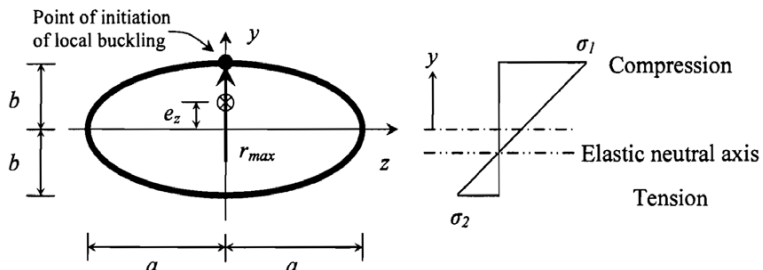
Gambar 2.7 Gaya pada *Tube Berpenampang Lingkaran*
(Khodayari, 2008)

Pada awal proses *bending*, deformasi tabung tetap elastis sampai tegangan tarik dan tegangan tekan yang diberikan di dalam *bend* atau di luar *bend* mencapai tegangan luluh atau *yield stress* dari material *tube*. Kemudian deformasi plastis dimulai. Pada posisi sudut ini, daerah pembentukan belum sepenuhnya terbentuk. Oleh karena itu, *bend radius tube* sebenarnya lebih besar daripada radius dari *bend die*.

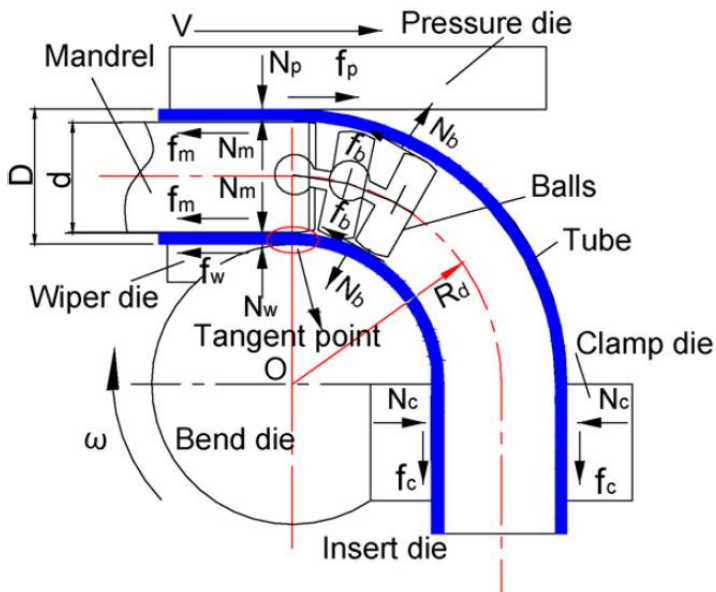
Pada proses *bending* lanjut, daerah deformasi plastik tumbuh di kedua penampang *tube* dan sepanjang sumbu panjangnya, sedangkan *bend radius tube* berkurang secara bertahap hingga bertepatan dengan *center line radius* (CLR) dari *bend die*. Pada titik ini, daerah pembentukan telah terbentuk dan tingkat maksimum deformasi plastis *tube* telah tercapai. Setelah daerah pembentukan terbentuk, deformasi plastis menjalar ke sepanjang sumbu *tube*. Selama sisa proses *bending*, *tube* telah ditarik seperempatnya melewati daerah pembentukan dan terdeformasi plastis ke arah *bend die*. Letak daerah pembentukan tidak berubah selama proses *bending* berlangsung. Pada fase pembentukan ini, beban *bending* dan gaya reaksi *bending* tetap pada tingkat maksimal sampai proses *bending* ini selesai.

Karena proses *bending*, tegangan tarik di luar dan tegangan tekan di dalam mengakibatkan reduksi ketebalan diluar dan meningkatkan ketebalan di dalam *bent tube*. Akibatnya, lokasi dari *strain-neutral axis* (*neutral axis*) bergerak ke arah kedalam *bend*. Sebuah sumbu baru di bawah garis tengah garis tengah *tube* (sumbu netral awal) menjadi sumbu netral sebenarnya. Fenomena ini disebut juga perpindahan sumbu netral (*displacement of neutral axis*).

(Khodayari, 2008)



Gambar 2.8 Gaya yang Bekerja pada *Tube Berpenampang Elips* (Gardner, 2011)



Gambar 2.9. *Free Body Diagram of Rotary Draw Bending* (Yang, 2010)

Beberapa komponen penting yang ada pada proses *rotary draw bending*:



II.2.1 Clamp Die

Clamp die merupakan salah satu bagian dari *rotary draw bending* yang berguna untuk mencegah benda kerja mengalami slip selama proses *rotary draw bending* berlangsung. Panjang dari *clamp die* dipengaruhi pertimbangan dari karakteristik benda kerja, termasuk diameter, dinding atau ketebalan dan tipe material, kekerasan dan perlakuan permukaan. Radius *bend* juga termasuk salah satu hal yang harus dipertimbangkan.

II.2.2 Pressure Die

Pressure die berfungsi untuk membantu benda kerja sesuai pada tempatnya dan memberikan gaya reaksi pada bagian benda kerja bebas. Gaya reaksi ini akan membantu proses *bending* pipa supaya berjalan. Tekanan yang diberikan pada benda kerja harus sesuai untuk menyeimbangkan gaya tarik dan gaya tekan dari proses *bending*. *Pressure die* dibagi menjadi 3 jenis:

a. *Moving Pressure Die*

Memiliki kelebihan yaitu dapat mengurangi gesekan yang terjadi antara benda kerja dan *pressure die* karena *pressure die* ikut bergerak sesuai dengan arah *bending* benda kerja.

b. *Stationary Pressure Die*

Gesekan yang terjadi pada *stationary die pressure* lebih besar daripada *moving pressure die*, hal ini dikarenakan *stationary pressure die* tidak bergerak saat proses terjadi.

c. *Roller Type Pressure Die*

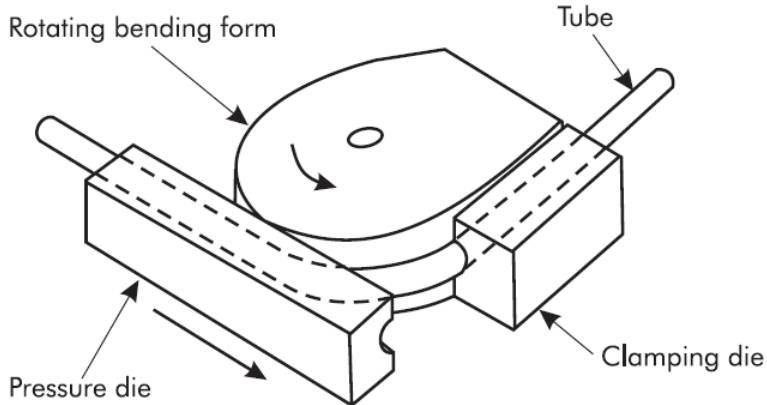
Pressure die ini ikut berputar ketika *bend die* mengalami rotasi karena adanya roller pada *die* ini. Biasa digunakan untuk proses *bending* dengan diameter besar atau radius besar.

II.2.3 Bend Die

Bend die merupakan bagian terpenting dari *rotary draw bending* karena bagian ini akan menentukan radius *bend* dari pipa. Alur pada *die* ini memberikan tahanan eksternal sehingga



memberikan tegangan tekan yang menyebabkan pipa terdeformasi. Bagian lurus dari *bend die* ini disebut dengan *clamping section* dimana berfungsi untuk memegang pipa sedangkan bagian yang berlawanan berfungsi untuk menekan pipa.



Gambar 2.10 Bagian Alat dari *Rotary Draw Bending* (Miller, 2003)

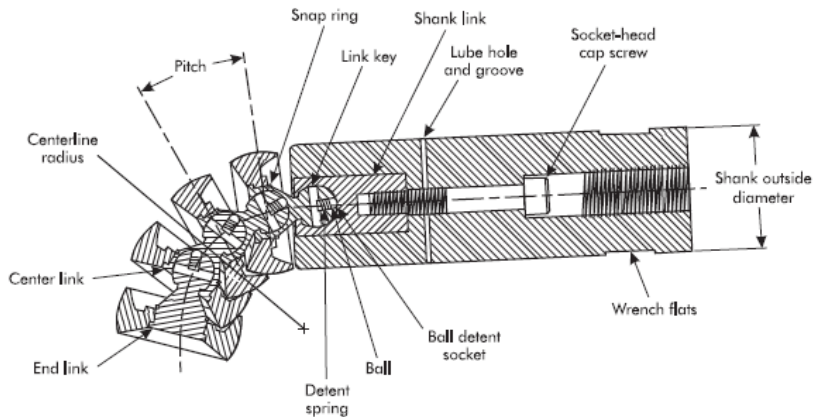
II.2.4 *Wiper Die*

Wiper die berfungsi untuk membantu mencegah terjadinya *wrinkling* pada benda kerja.

II.2.5 *Mandrel*

Berfungsi untuk mencegah terjadinya *flattening* dan *wrinkling* pada pipa atau benda kerja. *Mandrel* yang paling umum digunakan adalah *mandrel steel ball* atau fleksibel *steel ball*.

(Miller, 2003)



Gambar 2.11 *Steel Ball Mandrel* (Miller, 2003)

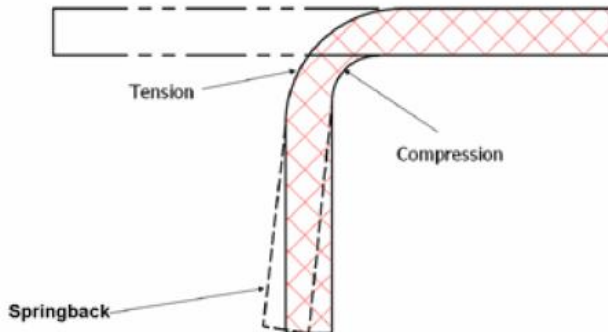
II.3 *Springback*

Saat *tube* logam mengalami proses *bending*, deformasi secara elastis-plastis muncul. Deformasi elastis akan mengalami *recovery* setelah dilakukan proses *unloading* atau *springback* akan muncul. *Springback* secara langsung akan mempengaruhi bentuk presisi dari *bent tube*. Saat besar sudut *springback* melebihi toleransi yang diperbolehkan, maka bentuk geometri tidak akan memenuhi persyaratan dan hal ini akan mengakibatkan performansi dari *tube* menurun secara signifikan. Fenomena ini sering terjadi pada *tube* yang memiliki kekuatan tinggi dan modulus Young yang kecil.

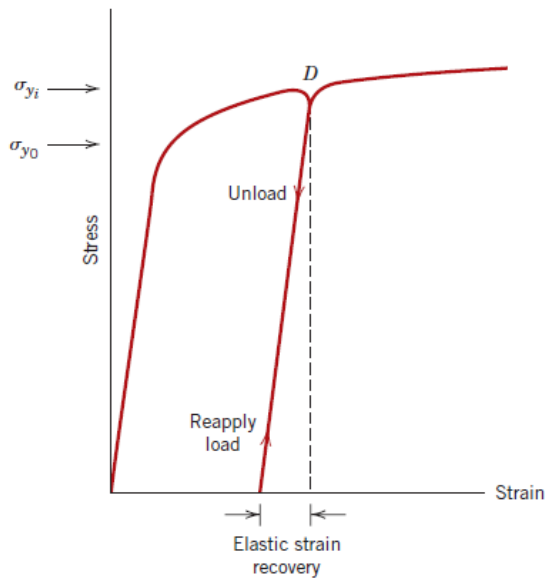
Selama proses *bending*, tegangan internal terbentuk dan setelah mengalami *unloading* tegangan internal juga tidak hilang. Setelah *bending*, ekstrados akan mengalami tegangan tarik residual dan intrados mengalami tegangan tekan sisa. Tegangan sisa menghasilkan momen *bending* internal yang menyebabkan *springback*. *Tube* akan terus mengalami *springback* hingga



momen *bending* internal jadi nol. Sudut *springback* tergantung pada material, ukuran *tube*, mandrel, mesin dan peralatan.



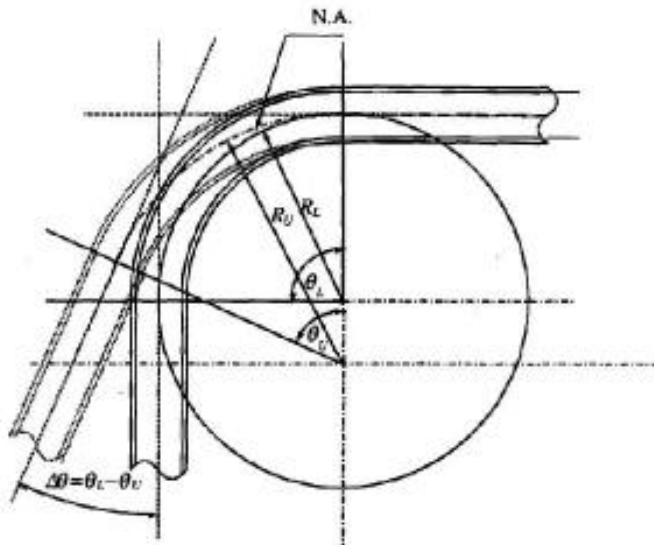
Gambar 2.12 *Springback* setelah *Unloading* (Thorat, 2015)



Gambar 2.13 Fenomena of Elastic Strain Recovery (Callister, 2007)



II.4 Springback Pada *Tube* Penampang Lingkaran



Gambar 2.14 Efek *Springback* setelah Pelepasan Beban (Thorat, 2015)

Seperti yang terlihat pada gambar 2.12, saat beban eksternal dilepas, total sudut *bending* akan berkurang akibat *springback*. Pada perhitungan analitik, diasumsikan total panjang bending di zona deformasi tetap sama.

$$L = \theta_l \cdot R_l = \theta_u \cdot R_u \quad (2.1)$$

So

$$\theta_u = \theta_l \cdot \frac{R_l}{R_u} \quad (2.2)$$

Sudut *springback* $\Delta\theta$ adalah

$$\Delta\theta = \theta_l - \theta_u \quad (2.3)$$

Perubahan kurvatur



$$\Delta K = Kl - Ku \quad (2.4)$$

Dimana

θl = Total sudut *bending* pada kondisi pemberian beban

θu = Total sudut *bending* pada kondisi pelepasan beban

Kl = kurvatur *bend* pada kondisi pembebanan

Ku = kurvatur *bend* pada kondisi pelepasan beban

Jadi,

$$Ku = Kl - \Delta K \quad (2.5)$$

Dari momen kurvatur, diagram kurvatur berubah karena *springback*

$$\Delta K = \frac{Ml}{\left(\frac{dM}{dK}\right)} \quad (2.6)$$

Dimana dM/dK adalah *slope* dari M dan K pada daerah elastis yang didapat dari persamaan

$$\frac{dM}{dK} = E.I \quad (2.7)$$

$I = \pi r^3 t$ = momen inersia *tube*

$KU = 1 / RU$ dengan mensubstitusikan (2.4) ke (2.1)

$$\theta u = \theta l Rl (Kl - \Delta K) \quad (2.8)$$

Dengan mensubstitusikan (2.5), (2.6) dan (2.7), didapat *springback* akhir

$$\theta u = \theta l \left(1 - \frac{Rl.Ml}{E.I} \right) \quad (2.9)$$

Dimana

θl = Total sudut *bending* pada kondisi pemberian beban

θu = Total sudut *bending* pada kondisi pelepasan beban



R_L = *Bending* radius pada kondisi beban

M_L = momen *bending* yang bekerja pada proses

E = Modulus Elastisitas

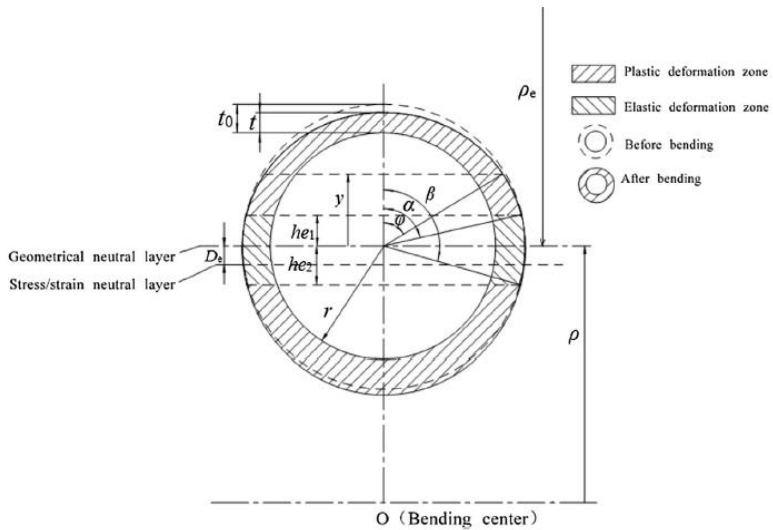
I = Momen inersia dari area *tube*

(Thorat, 2015)

Untuk *tube* yang mengalami pembebanan eksternal, ketebalan dinding pada busur bagian luar akan mengalami penipisan dan ketebalan dinding pada bagian dalam akan mengalami penebalan dikarenakan adanya deformasi akibat *tensile* dan *compressive* pada kedua area ini. Lapisan regangan netral berada diantara deformasi *tensile* luar dan deformasi *compressive* dalam *tube*. Lapisan regangan netral mengalami *offset* ke arah titik pusat *bending* dari bagian netral geometris dikarenakan pola tegangan asimetris. Dengan demikian, momen gaya menjadi seimbang dibagian dalam dan luar yang terdeformasi selama proses *bending*.

Deformasi elastis terjadi terlebih dahulu selama pembebanan eksternal. Seiring dengan pembebanan internal yang meningkat, deformasi yang terjadi juga mengalami peningkatan. Selama proses *bending*, bagian terluar dan terdalam material telah mencapai batas *yield*. Setelah itu material mengalami deformasi plastis. Semakin dekat ke bagian netral maka semakin kecil deformasi plastis yang muncul. Beberapa material yang dekat dengan bagian netral akan mengalami deformasi elastis selama proses *bending*. Oleh karena itu, area dari *tube* dapat dibagi menjadi 2 bagian yang mengalami deformasi elastis dan 2 bagian yang mengalami deformasi plastis, termasuk bagian luar yang mengalami deformasi elastis dan plastis dan bagian dalam yang mengalami deformasi elastis dan plastis.

(Zhang, 2016)



Gambar 2.15 Area dari *Tube* (Zhang, 2016)

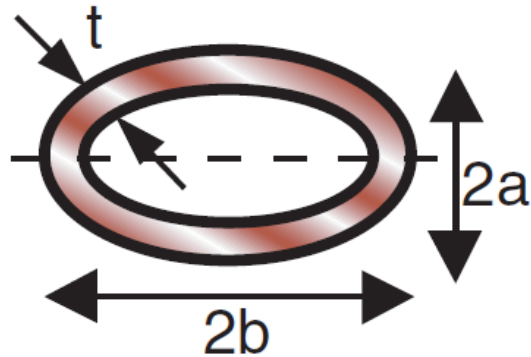
II.5 *Bending Moment* Pada Penampang Lingkaran dan Elips

II.5.1 *Bending Moment* Elips

Pencarian momen *bending*, M , untuk *tube* dengan penampang oval/elips dapat menggunakan persamaan

$$M = Z\sigma_s \quad (2.10)$$

Dimana Z adalah *section modulus* dan σ_s adalah *yield stress*.



Gambar 2.16 Area pada Penampang Elips (Ashby, 2005)

Untuk *section modulus* pada elips dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$$Z = \frac{\pi}{4} a^2 t \left(1 + \frac{3b}{a} \right) \quad (2.11)$$

Dan penampang oval memiliki momen inersia dengan persamaan

$$I = \frac{\pi}{4} a^3 t \left(1 + \frac{3b}{a} \right) \quad (2.12)$$

(Ashby, 2005)

II.5.2 Bending Moment Lingkaran

Momen *bending* pada kedua bagian dari sumbu netral adalah sama. Total momen bending internal, M , dapat dicari dengan cara mengalikan kuadran terluar dengan 4, mengacu pada persamaan (2.13) dan (2.18)

$$P_o(0.636r + E) = P_i(0.636r - E)$$

Or



$$E = 0.636r \frac{P_i - P_o}{P_i + P_o} \quad (2.13)$$

Dimana konstanta 0.636 adalah jarak dari pusat gravitasi setengah luas ke sumbus x. P_o dan P_i adalah jumlah dari semua gaya yang bekerja pada *centroid* dari bagian luar dan bagian dalam dinding area.

$$P_o = \int_0^{90^\circ} \alpha_{xo} dA_o = \int_0^{90^\circ} \alpha_{xo} r t_o d\alpha \quad (2.14)$$

$$P_i = \int_{90^\circ}^{180^\circ} \alpha_{xi} dA_i = \int_{90^\circ}^{180^\circ} \alpha_{xi} r t_i d\alpha \quad (2.15)$$

Substitusi persamaan

$$\alpha_x = \alpha_s \frac{2k + 1}{2k + 2 - \cos \alpha} \quad (2.16)$$

Dan persamaan

$$t_o = (1 - \delta_{ro})T = \left(1 - \frac{2k + \cos \alpha}{4k + 3 - \cos \alpha} \frac{\cos \alpha}{2k}\right) T \quad (2.17)$$

Menjadi persamaan (2.18)



$$P_o = \sigma_s r T \int_0^{90^\circ} \left(\frac{2k+1}{2k+2-\cos\alpha} \right) \times \left(1 - \frac{2k+\cos\alpha}{4k+3-\cos\alpha} \frac{\cos\alpha}{2k} \right) d\alpha = \alpha_s r T N_o \quad (2.18)$$

Dimana

$$N_o = \int_0^{90^\circ} \left(\frac{2k+1}{2k+2-\cos\alpha} \right) \times \left(1 - \frac{2k+\cos\alpha}{4k+3-\cos\alpha} \frac{\cos\alpha}{2k} \right) d\alpha \quad (2.19)$$

Substitusi persamaan

$$\alpha_x = -\alpha_s \frac{2k+1}{2k+\cos\alpha} \quad (2.20)$$

Dan persamaan

$$t_i = (1 + \delta_{ri})T = \left(1 - \frac{2k+2-\cos\alpha}{4k+1+\cos\alpha} \frac{\cos\alpha}{2k} \right) T \quad (2.21)$$

Menjadi persamaan (2.)

$$P_i = \alpha_s r T \int_{90^\circ}^{180^\circ} \left(\frac{2k+1}{2k+\cos\alpha} \right) \times \left(1 - \frac{2k+2-\cos\alpha}{4k+1+\cos\alpha} \frac{\cos\alpha}{2k} \right) d\alpha = \alpha_s r T N_i \quad (2.22)$$

Dimana

$$N_i = \int_{90^\circ}^{180^\circ} \left(\frac{2k+1}{2k+\cos\alpha} \right) \left(1 - \frac{2k+2-\cos\alpha}{4k+1+\cos\alpha} \frac{\cos\alpha}{2k} \right) d\alpha$$



(2.23)

Lalu persamaan (2.) akan menjadi

$$E = 0.636r \frac{N_i - N_o}{N_i + N_o} \quad (2.24)$$

Dikarenakan persamaan (2.18) hingga (2.24) terlalu kompleks untuk digunakan pada perhitungan teknik, maka persamaan sederhana berikut dapat berlaku

$$E_n = \frac{0.42}{k} r \quad (2.25)$$

Dari persamaan (2.) dan (2.) tersebut, maka M adalah

$$M = 4P_o(0.636r + E) = 4\alpha_s r T N_o \left(0.636r + \frac{0.42}{k} \right) \quad (2.26)$$

Section Modulus, W adalah

$$W = 0.1 \frac{D^4 - d^4}{D} = 0.8rT \frac{D^2 + d^2}{D} \quad (2.27)$$

Substitusi persamaan (2.) dan (2.), momen *bending* menjadi

$$M = \alpha_s W \left[\frac{5rD}{D^2 + d^2} \left(0.636 + \frac{0.42}{k} \right) N_o \right] = \alpha_s W I \quad (2.28)$$

Dimana



$$I = \left[\frac{5rD}{D^2 + d^2} \left(0.636 + \frac{0.42}{k} \right) N_o \right] \quad (2.29)$$

Persamaan sederhana untuk I adalah J .

$$J = 1.41 + \frac{0.42}{k} \quad (2.30)$$

Substitusi persamaan (2.) ke persamaan (2.), dan momen *bending* menjadi

$$M = \alpha_s W \left(1.41 + \frac{0.42}{k} \right) \quad (2.31)$$

(Tang, 2000)

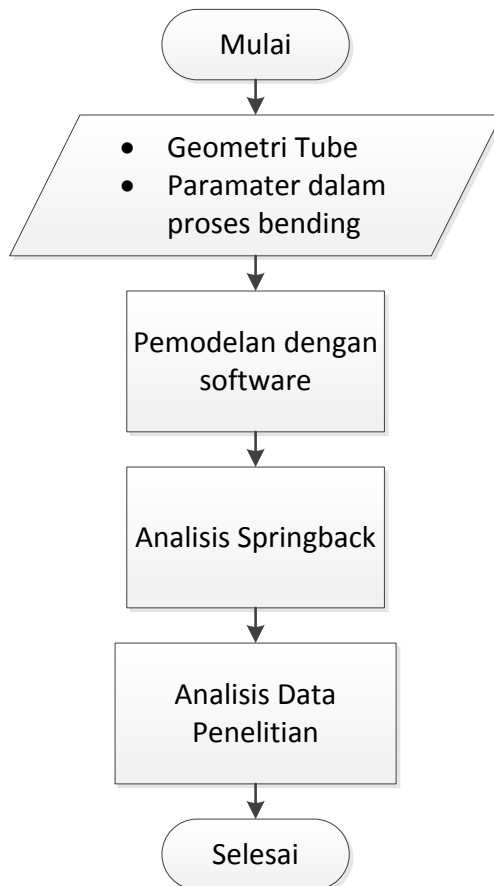


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

Bab III berisi metode yang digunakan pada penelitian, spesifikasi material dan pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan *software* elemen hingga.

III.1 Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



III.2 Spesifikasi Material dan Parameter *Bending*

III.2.1 Material *tube*

Pada penelitian ini, material yang digunakan pada proses *tube bending* adalah AISI 304L. Data material yang ada diperoleh dari North American Stainless dengan menggunakan standar UNS S30430, EN 1.4307 dan ASM Handbook Vol 1. Komposisi dari AISI 304L dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan untuk properti material AISI 304L dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307)

Unsur	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Min						18.00	8.00
Max	0.03	2.0	0.045	0.030	1.00	20.00	12.00

Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L

<i>Poisson Ratio</i>	0.3
Tangent Modulus (Gpa)	1.4936
Yield Stress (Mpa)	210
Modulus Elastisitas (Gpa)	196
Density (kg/m ³)	7850
<i>Ultimate Tensile Strength (Mpa)</i>	564

III.2.2 Geometri *Tube*

Geometri yang digunakan pada penelitian ini ada dua yaitu *tube* berpenampang lingkaran dan *tube* berpenampang elips. Geometri elips memiliki perbandingan radius pertama 1 kali radius lingkarang dan radius kedua 0.5 kali radius lingkarang. Kedua geometri memiliki panjang yang sama yaitu 800 mm. Terdapat 3 pipa yang digunakan pada penelitian ini yaitu *tube* dengan *outer diameter* 30 mm, 40mm, dan 50 mm dengan ketebalan 3 mm.

**Tabel 3.3** Geometri *Tube* Penampang Lingkaran

no	Ukuran OD (mm)	ketebalan dinding (mm)
1	30	3
2	40	3
3	50	3

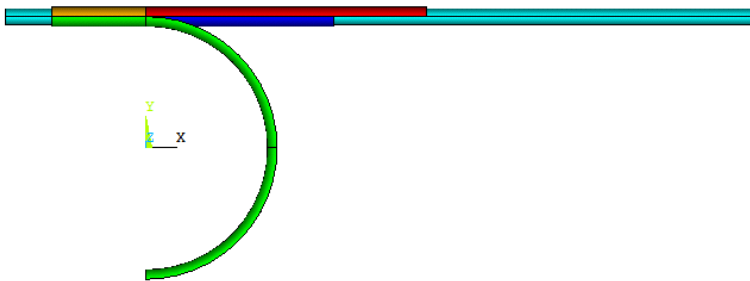
Tabel 3.4 Geometri *Tube* dengan Penampang Elips

no	Major	Minor	ketebalan dinding (mm)
1	40	20	3

III.2.3 Rotary Draw Bending

Desain alat dan komponen-komponen *rotary draw bending* dapat dilihat pada Gambar 3.2.

**Gambar 3.2** *Rotary Draw Bending* Penampang Lingkaran



Gambar 3.3 *Rotary Draw Bending* Penampang Elips

Tabel 3.5 Parameter *Rotary Draw Bending*

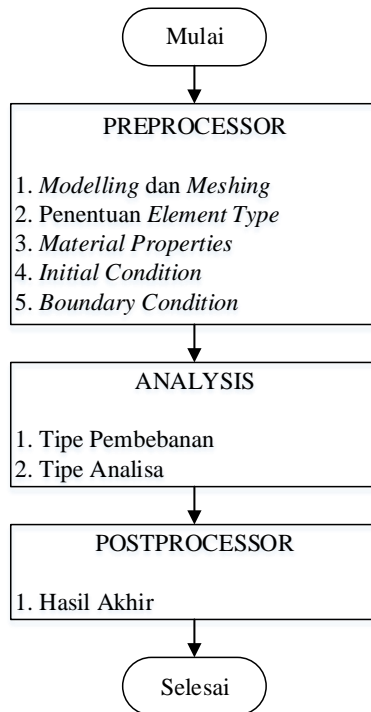
<i>Pressure (Mpa)</i>	5
<i>Coefficient Friction (u)</i>	
<i>Pressure Die</i>	0.1
<i>Clamp Die</i>	0.2
<i>Others</i>	0.1
<i>Bending Radius (mm)</i>	140

III.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis elemen hingga yaitu ANSYS dengan modul *Mechanical APDL Release 15.0* yang digunakan untuk membuat pemodelan geometri dan memodelkan simulasi *rotary draw bending* dan *springback*.

III.4 Proses Penelitian

Adapun diagram alir pemodelan *bending* pada *tube* dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL Release 15.0 dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan Menggunakan Metode Elemen Hingga.

Terdapat beberapa pembebanan yang digunakan pada penelitian ini yang dapat dilihat pada Tabel 3.7.

**Tabel 3.6** Variasi Pembebanan pada Percobaan

no	Ukuran OD (mm)	ketebalan dinding (mm)	sudut	<i>Internal Pressure (Mpa)</i>
1	30	3	30	5
2			60	5
3			90	5
4			120	5
5			150	5
6			180	5
7	40	3	30	5
8			60	5
9			90	5
10			120	5
11			150	5
12			180	5
13	50	3	30	5
14			60	5
15			90	5
16			120	5
17			150	5
18			180	5
19	40	1	90	
20		2	90	
21		3	90	
22		4	90	

**Tabel 3.7** Variasi Pembebanan Penampang Elips

no	Radius 1	Radius 2	ketebalan dinding (mm)	sudut	<i>Internal Pressure</i> (Mpa)
1	40	20	3	30	5
2				60	5
3				90	5
4				120	5
5				150	5
6				180	5

III.5 Meshing

Meshing yang digunakan pada simulasi ini menggunakan metode *free mesh* dengan elemen segitiga dan *smartsized* 4 untuk *tube* berpenampang lingkaran dan *smartsized* 6 untuk *tube* berpenampang elips. Elemen segitiga dipilih karena mempermudah memperoleh konvergensi namun diperlukan *meshing* dengan ukuran yang cukup halus.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini analisa *springback* dilakukan dengan menggunakan variasi geometri *tube* yang mencakup ukuran diameter *tube* dan sudut *bending* serta dengan membandingkan antara hasil simulasi *springback* dari *tube* berpenampang lingkaran dan *tube* berpenampang elips. Variasi diameter yang digunakan yaitu 30 mm, 40 mm dan 50 mm dengan variasi sudut yang digunakan sebesar 30°, 60°, 90°, 120°, 150° dan 180° serta *tube* dengan penampang lingkaran dan *tube* dengan penampang elips untuk membandingkan sudut *springback* yang muncul dari hasil simulasi yang telah dilakukan.

Pemodelan analisa *springback* dimulai dengan membuat desain *tube* beserta seluruh cetakannya. Pada *tube* diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa untuk mencegah terjadinya *wrinkling*. Setelah melakukan pengaturan pada *software* yang digunakan maka dilakukan proses *solving*. Hasil yang didapat dari simulasi adalah perpindahan yang terjadi selama rotasi dengan jarak sesuai dengan sudut yang ditentukan. Hasil ini belum terlihat *springback* yang muncul. Setelah itu dilakukan proses penghilangan tekanan dari benda kerja. Hasil simulasi yang didapat kemudian dilakukan proses *kill element* untuk menghilangkan elemen dari *bend die* atau dapat dikatakan sebagai proses pelepasan alat (*removing tool*). Setelah dilakukan simulasi lanjutan eliminasi tekanan dan *kill element* maka *springback* dapat diketahui.

Hasil yang didapat dari simulasi, kemudian dibandingkan dengan besaran sudut *springback* yang didapat dari perhitungan dengan menggunakan rumus matematisnya. Setelah itu dilakukan langkah yang sama untuk proses *rotary draw bending* pada *tube* dengan penampang elips untuk mendapatkan besar sudut *springback* yang ada.



Beberapa simulasi dengan metode elemen hingga mengenai *springback* pada *tube* telah dilakukan dengan berbagai kondisi yang berbeda yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Kondisi Simulasi *Springback*

no	Ukuran OD (mm)	ketebalan dinding (mm)	sudut	<i>Internal Pressure</i> (Mpa)
1	30	3	30	5
2			60	5
3			90	5
4			120	5
5			150	5
6			180	5
7	40	3	30	5
8			60	5
9			90	5
10			120	5
11			150	5
12			180	5
13	50	3	30	5
14			60	5
15			90	5
16			120	5
17			150	5
18			180	5

**Tabel 4.2** Kondisi Simulasi *Springback* Penampang Elips

no	Radius 1	Radius 2	ketebalan dinding (mm)	sudut	<i>Internal Pressure</i> (Mpa)
1	40	20	3	30	5
2				60	5
3				90	5
4				120	5
5				150	5
6				180	5

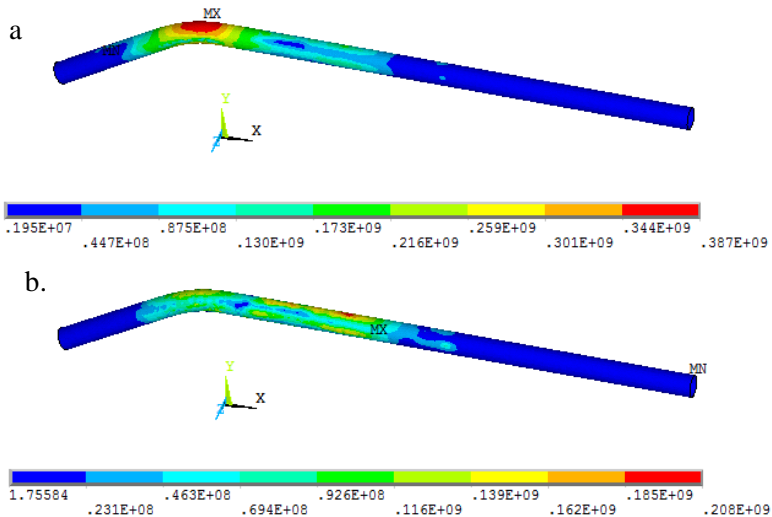
Pada proses simulasi *rotary draw bending* ini akan dianalisa mengenai pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback*, serta pengaruh ukuran penampang terhadap sudut *springback*, analisa pengaruh ketebalan *tube* terhadap sudut *springback*, dan perbandingan sudut *springback* penampang lingkaran dan penampang elips.

IV.1 Von Mises Stress Pada Tube Berpenampang Lingkaran

Pada penelitian ini didapatkan hasil *Von Mises stress* yang dapat digunakan untuk melihat hasil dari tegangan yang bekerja pada proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan.

IV.1.1 Tube Lingkaran dengan Diameter 30 mm

Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° didapat hasil berupa *von mises stress*. Hasil dari *von mises stress* dapat digunakan untuk melihat tegangan yang bekerja pada proses *rotary draw bending* yang disimulasikan. Dari hasil juga dapat dilihat persebaran dari tegangan yang bekerja pada proses dari *rotary draw bending* tersebut dan juga dapat dilihat dimana terdapat pembebanan maksimum dan pembebanan minimum.

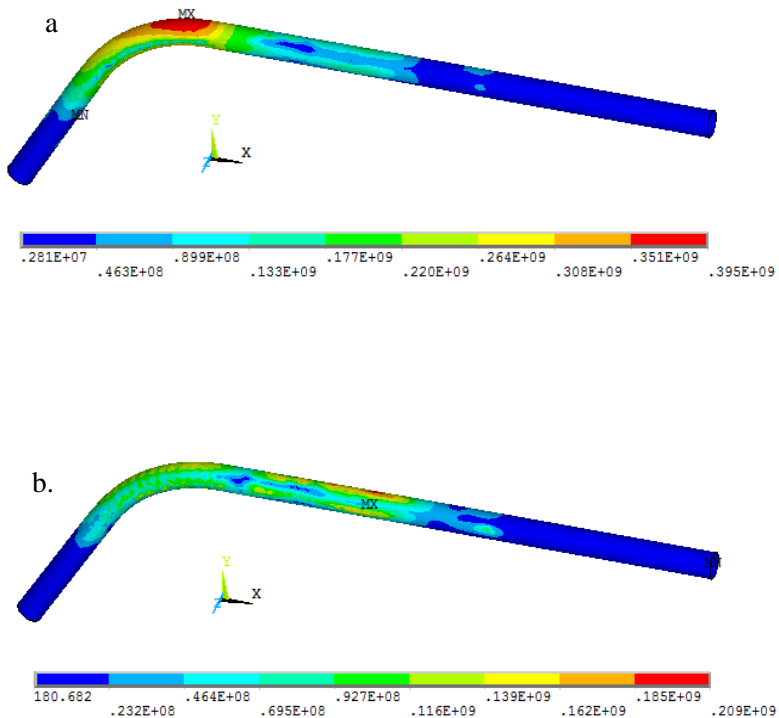


Gambar 4.1 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) Loading b) Unloading

Gambar 4.1 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm pada sudut 30 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 387 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 208 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi



pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

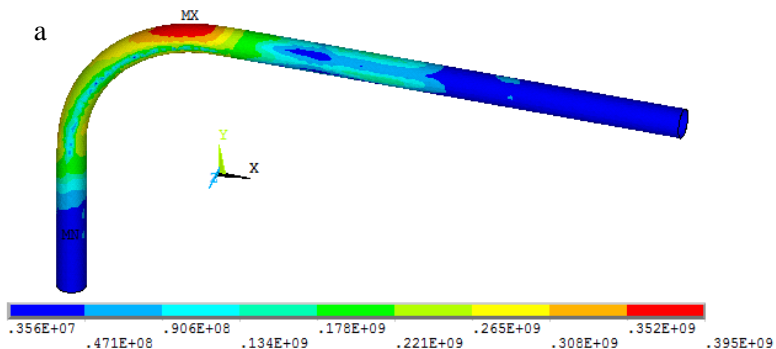


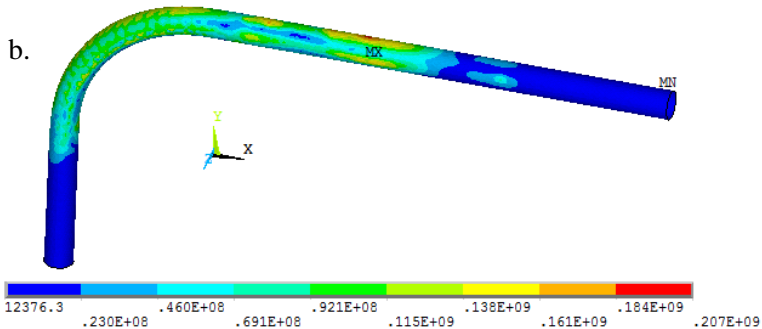
Gambar 4.2 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.2 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm pada sudut 60 derajat. Dari gambar hasil simulasi



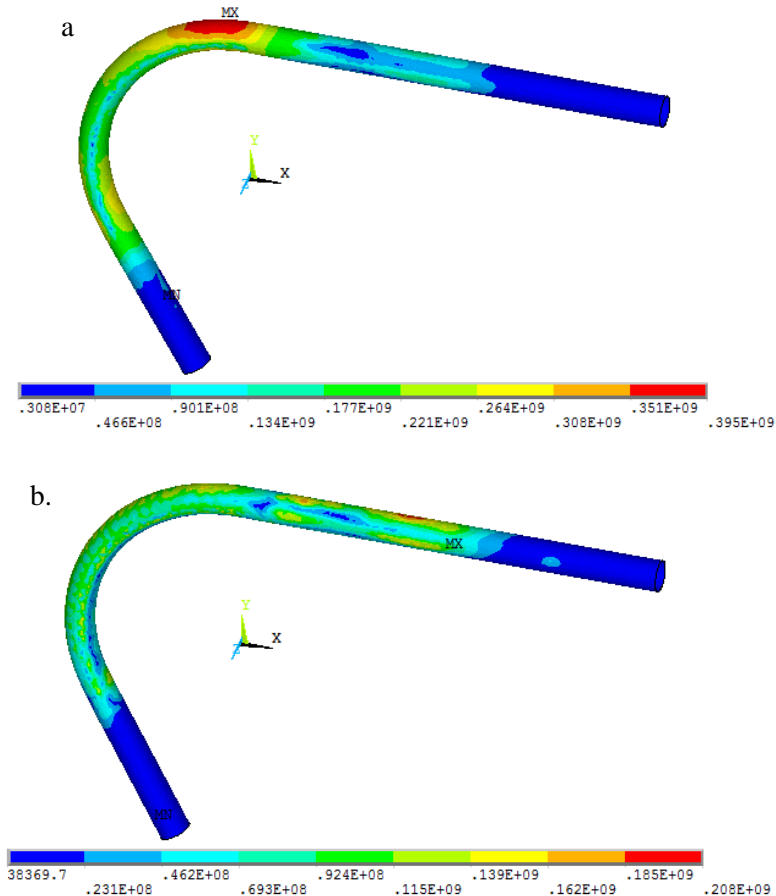
yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 395 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 209 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.





Gambar 4.3 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang* Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.3 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm pada sudut 90 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 395 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 207 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

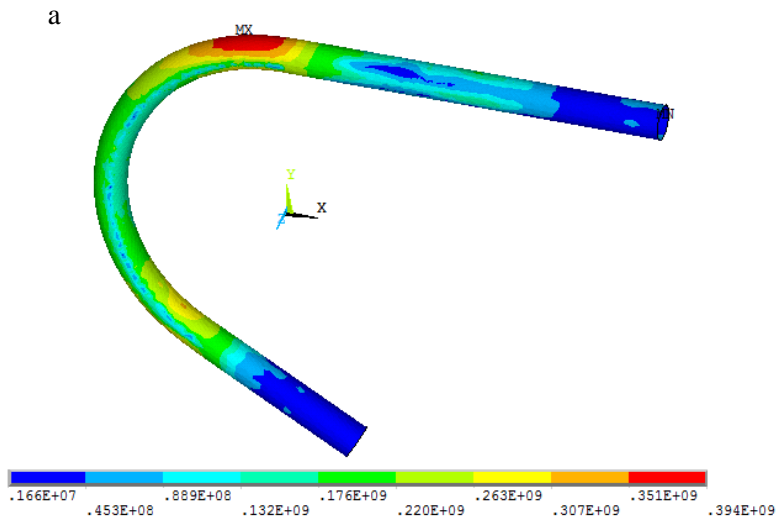


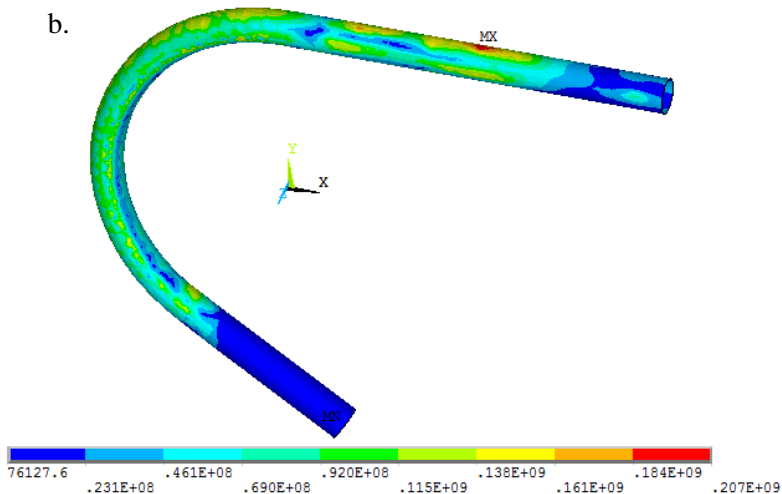
Gambar 4.4 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) Loading b) Unloading

Gambar 4.4 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm pada sudut 120 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada



proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 395 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 208 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.



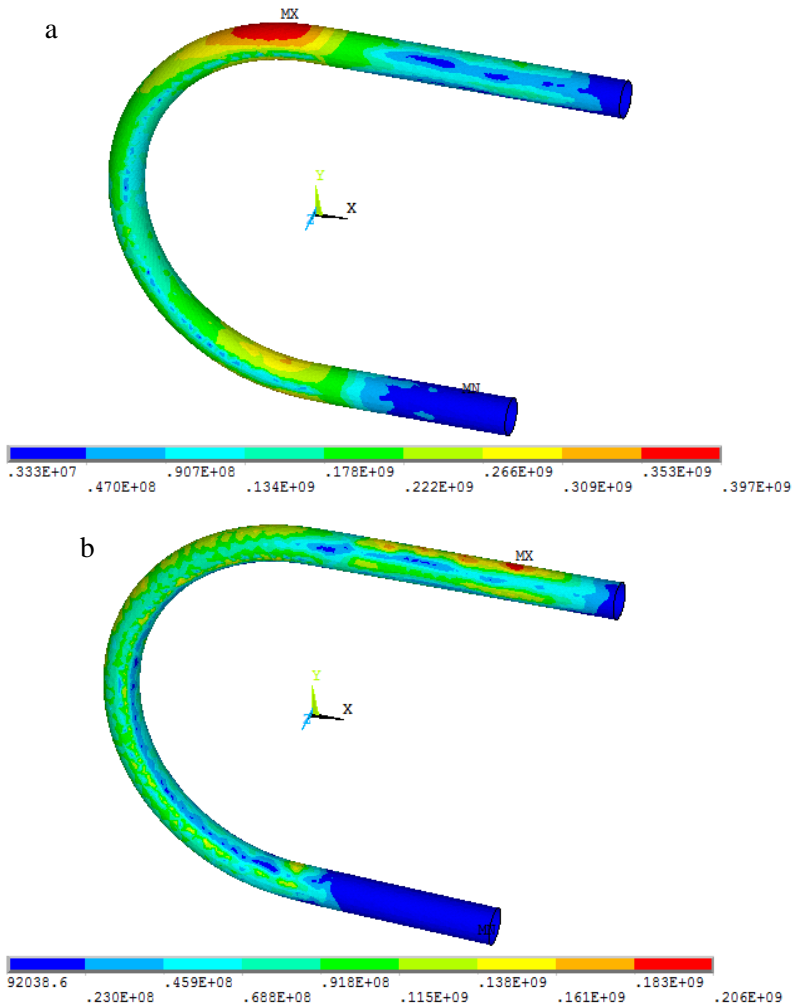


Gambar 4.5 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang* Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.5 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm pada sudut 150 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 394 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 207 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi



pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.





Gambar 4.6 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang* Lingkaran dengan Diameter Luar 30 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

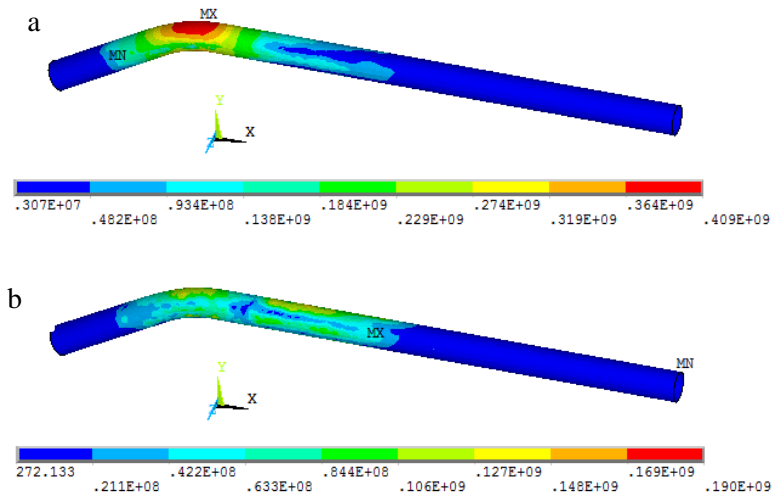
Gambar 4.6 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm pada sudut 180 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 397 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 206 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

IV.1.2 Tube Lingkaran dengan Diameter 40 mm

Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° didapat hasil berupa *von mises stress*. Hasil dari *von mises stress* dapat digunakan untuk melihat tegangan yang bekerja pada proses *rotary draw bending* yang disimulasikan. Dari hasil juga dapat dilihat persebaran dari tegangan yang bekerja pada proses dari *rotary draw bending*



tersebut dan juga dapat dilihat dimana terdapat pembebanan maksimum dan pembebanan minimum.

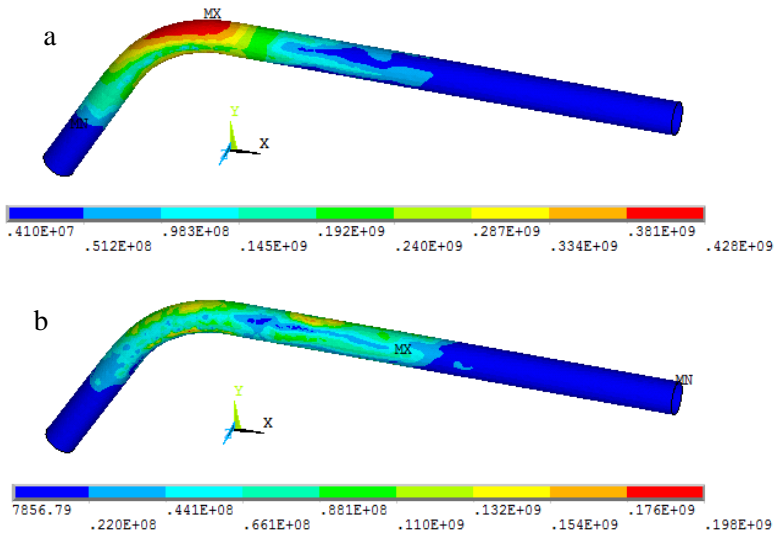


Gambar 4.7 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) Loading b) Unloading

Gambar 4.7 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 30 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 409 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan



tooling, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 190 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

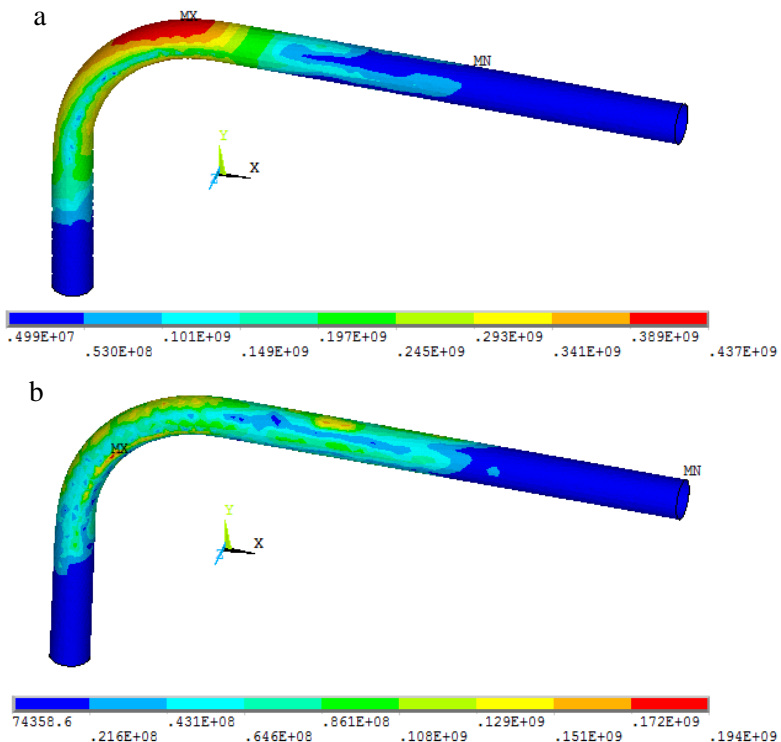


Gambar 4.8 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang* Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.8 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 60 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna



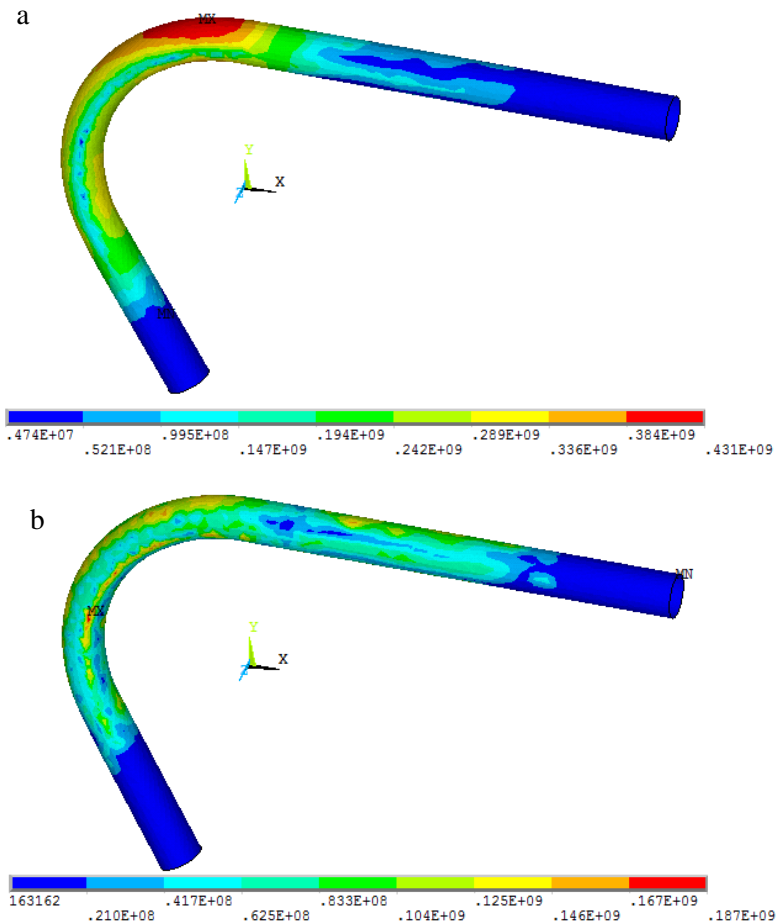
merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 428 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 198 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.





Gambar 4.9 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang Lingkaran* dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.9 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 90 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 437 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 194 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

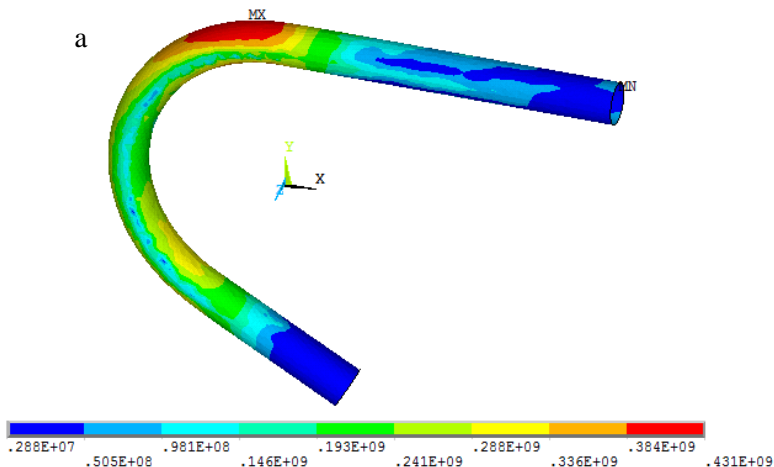


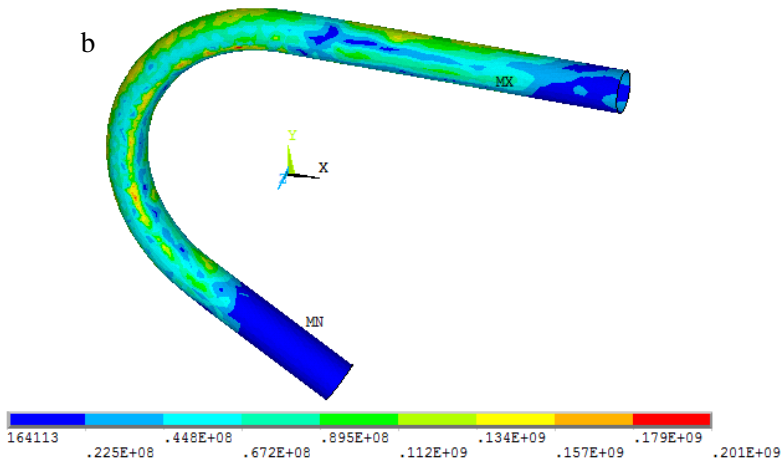
Gambar 4.10 *Von Mises Stress* pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.10 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada tube berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar



sebesar 40 mm pada sudut 120 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 431 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 187 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.



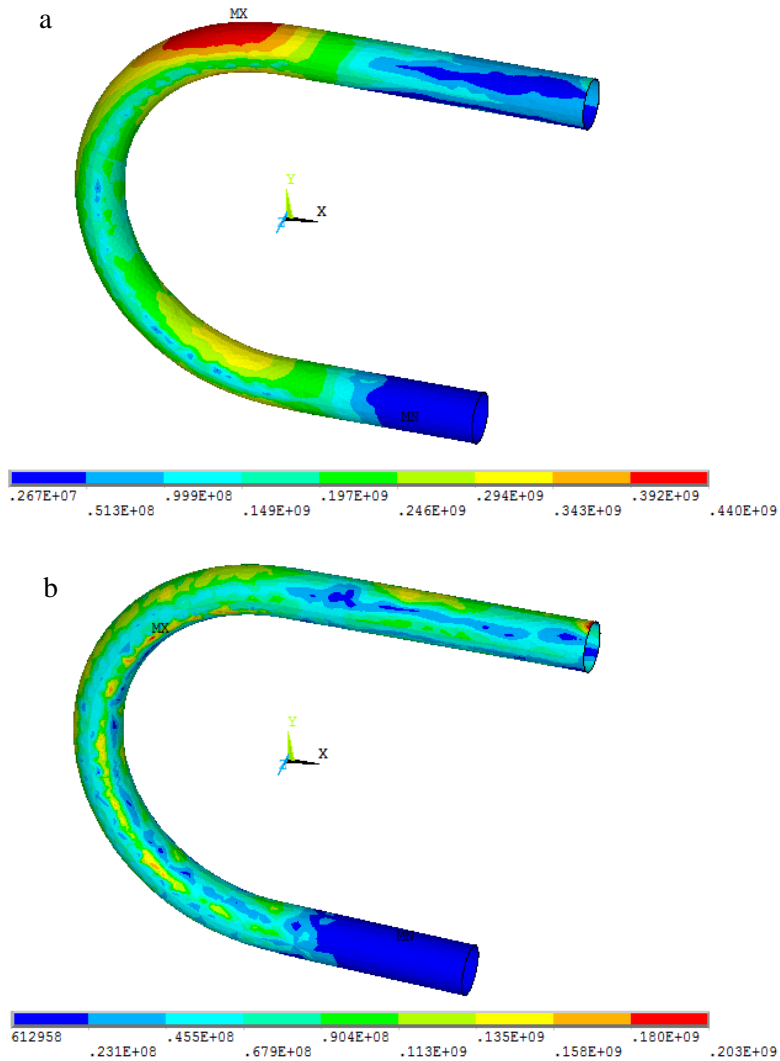


Gambar 4.11 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) Loading b) Unloading

Gambar 4.11 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 150 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 431 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 201 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada



proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.



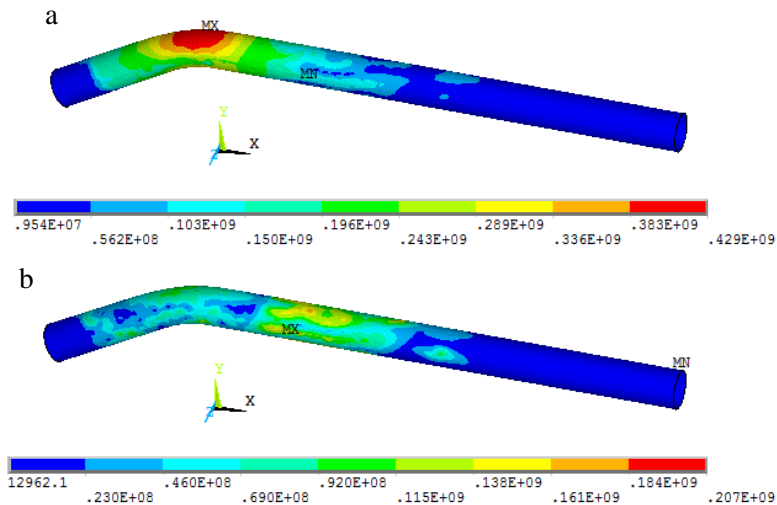


Gambar 4.12 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang Lingkaran* dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.12 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 180 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 440 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 203 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

IV.1.3 Tube Lingkaran dengan Diameter 50 mm

Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° didapat hasil berupa *von mises stress*. Hasil dari *von mises stress* dapat digunakan untuk melihat tegangan yang bekerja pada proses *rotary draw bending* yang disimulasikan. Dari hasil juga dapat dilihat persebaran dari tegangan yang bekerja pada proses dari *rotary draw bending* tersebut dan juga dapat dilihat dimana terdapat pembebanan maksimum dan pembebanan minimum.

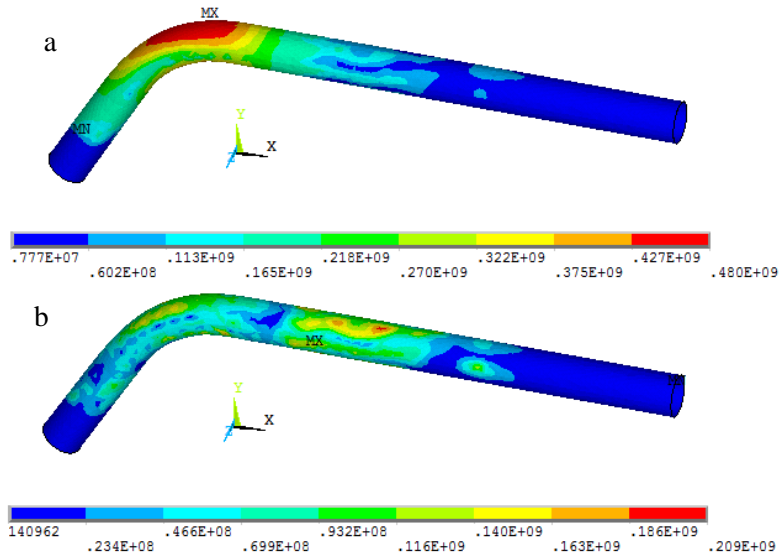


Gambar 4.13 *Von Mises Stress* pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.13 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm pada sudut 30 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 429 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 207 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi



pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

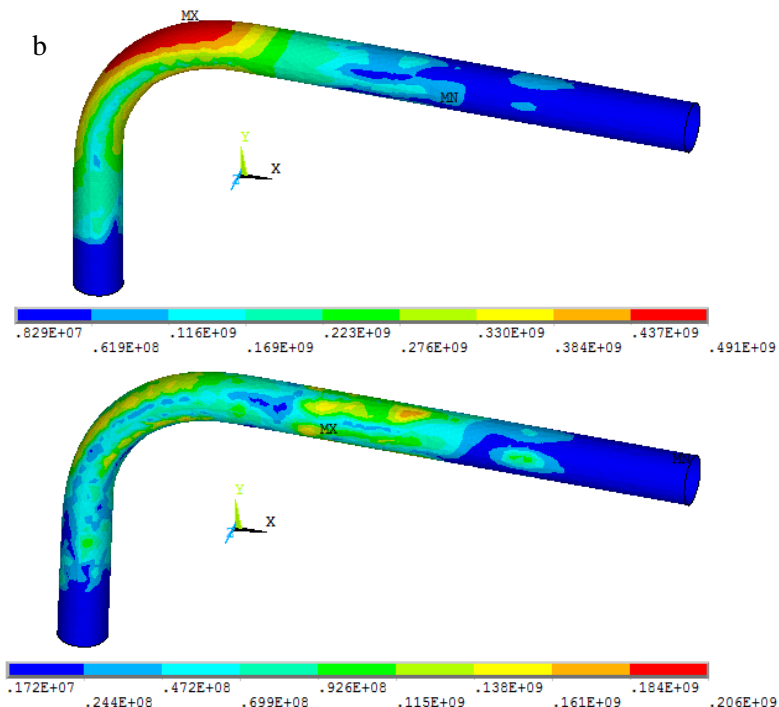


Gambar 4.14 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.14 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm pada sudut 60 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan



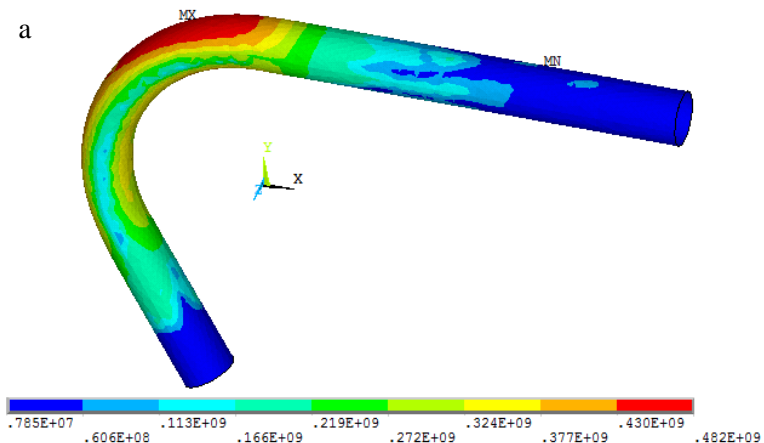
tooling. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 480 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 209 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

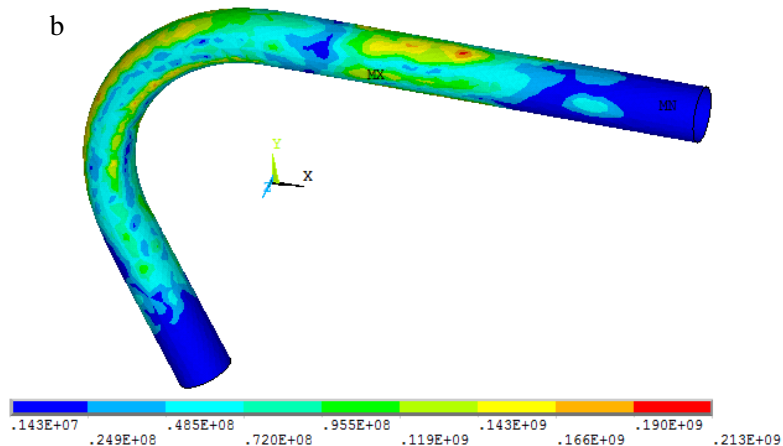


Gambar 4.15 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*



Gambar 4.15 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm pada sudut 90 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 491 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 206 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.



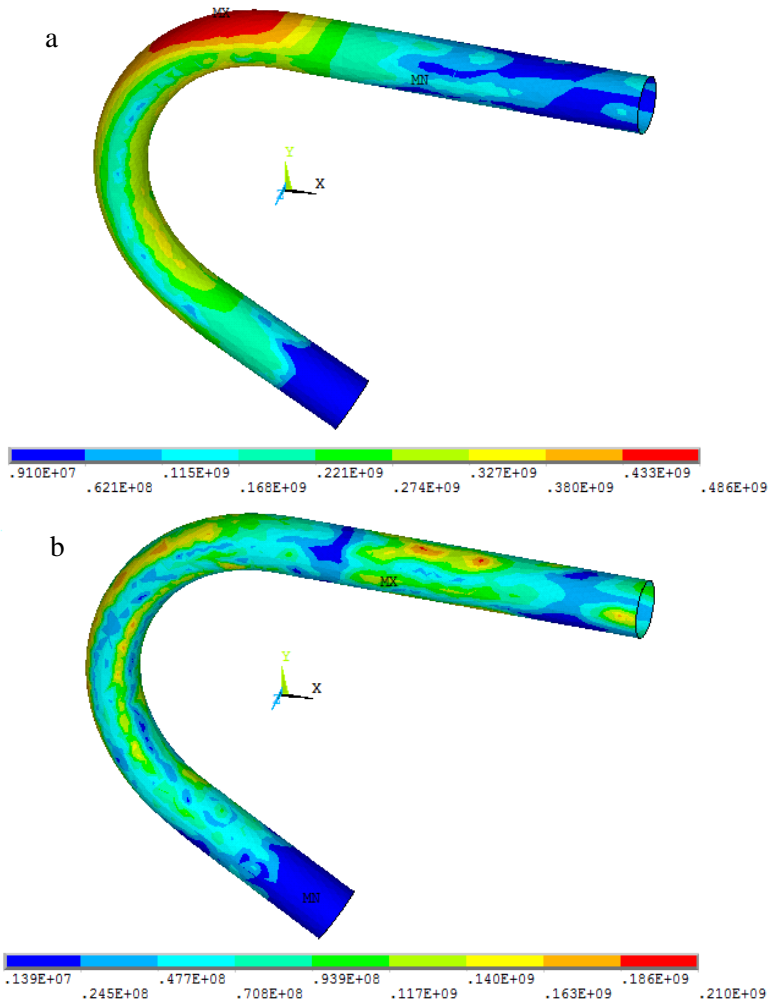


Gambar 4.16 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) Loading b) Unloading

Gambar 4.16 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm pada sudut 120 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 482 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 213 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada



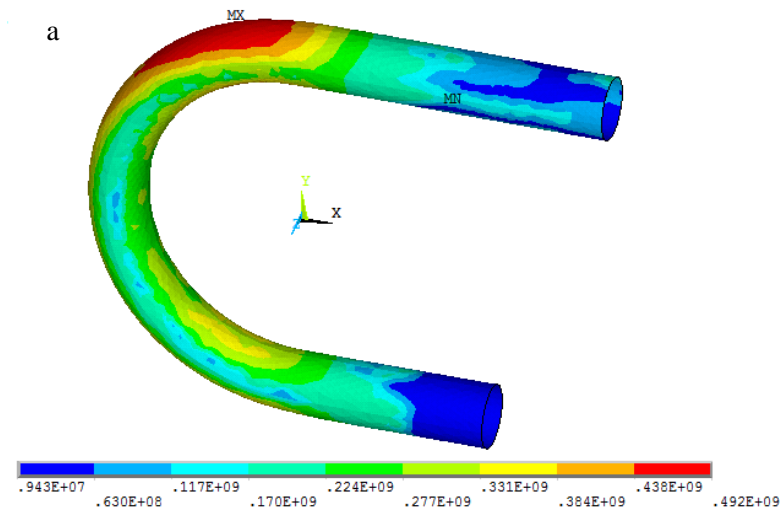
proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

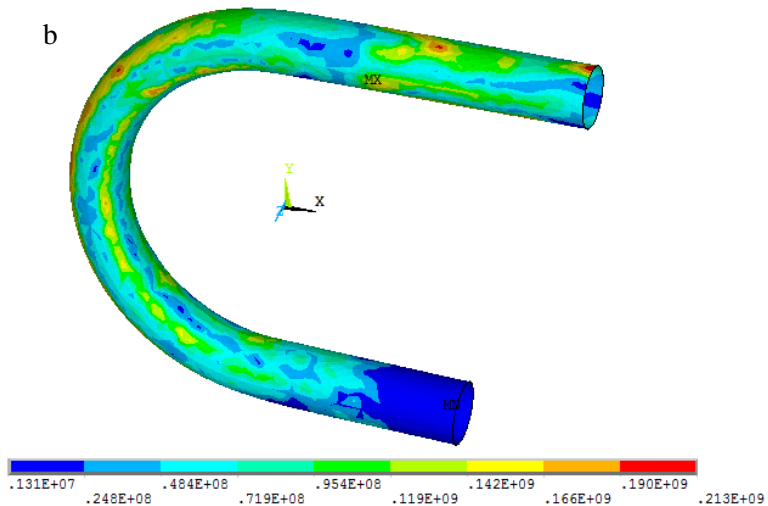


Gambar 4.17 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*



Gambar 4.17 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm pada sudut 150 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 486 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 210 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.





Gambar 4.18 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter Luar 50 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) Loading b) Unloading

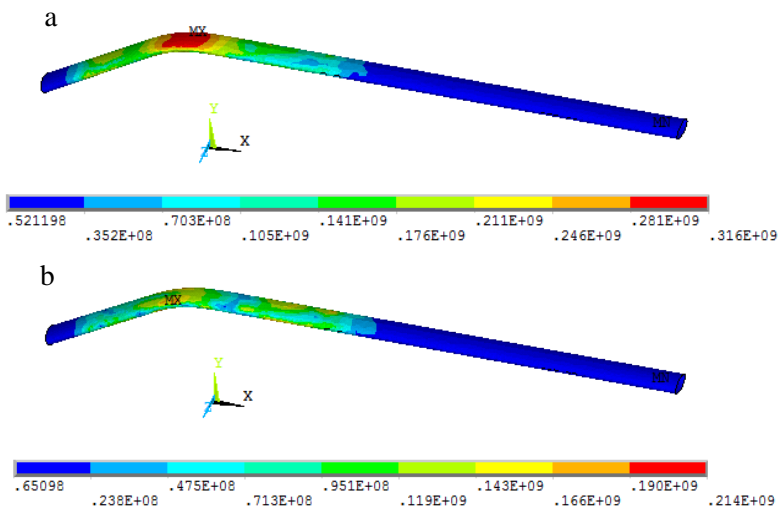
Gambar 4.18 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm pada sudut 180 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 492 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 213 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi



pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

IV.2 Von Mises Stress Pada Tube Berpenampang Elips

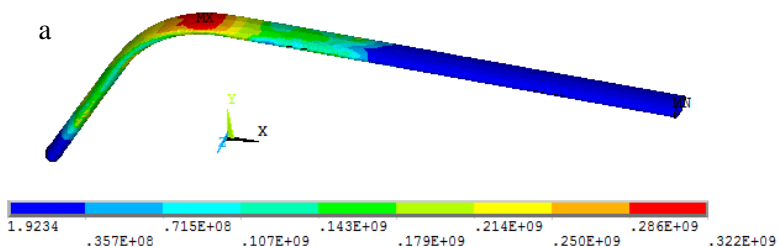
Pada penelitian ini didapatkan hasil *Von Mises stress* yang dapat digunakan untuk melihat hasil dari tegangan yang bekerja pada proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° didapat hasil berupa *von mises stress*. Hasil dari *von mises stress* dapat digunakan untuk melihat tegangan yang bekerja pada proses *rotary draw bending* yang disimulasikan. Dari hasil juga dapat dilihat persebaran dari tegangan yang bekerja pada proses dari *rotary draw bending* tersebut dan juga dapat dilihat dimana terdapat pembebanan maksimum dan pembebanan minimum.

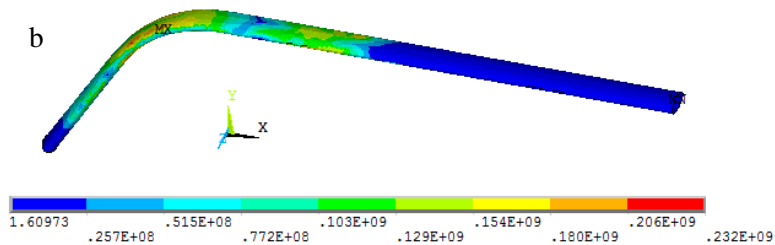




Gambar 4.19 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang Elips* dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 30 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

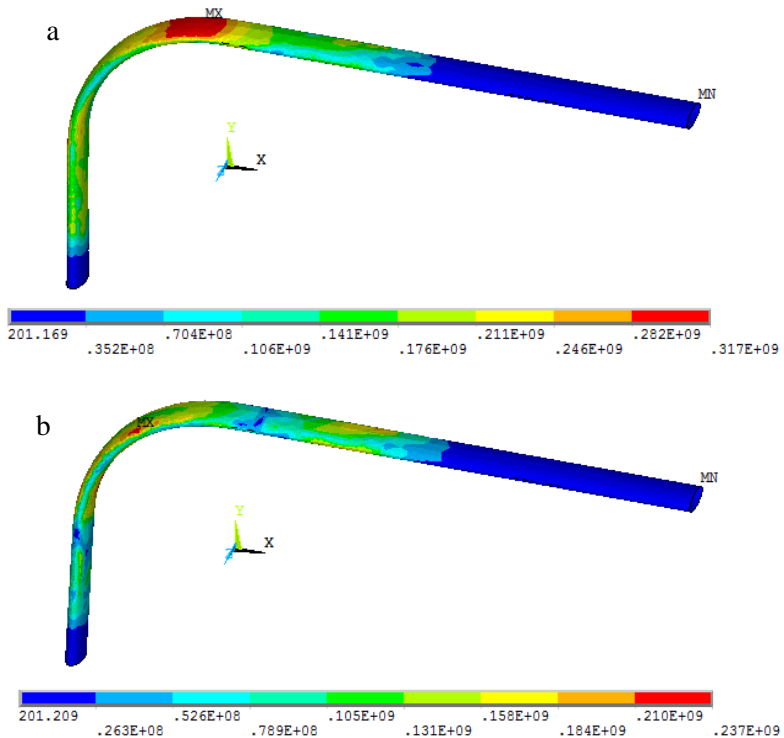
Gambar 4.19 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 30 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 316 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 214 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.





Gambar 4.20 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang Elips* dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 60 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.20 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 60 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 322 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 232 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

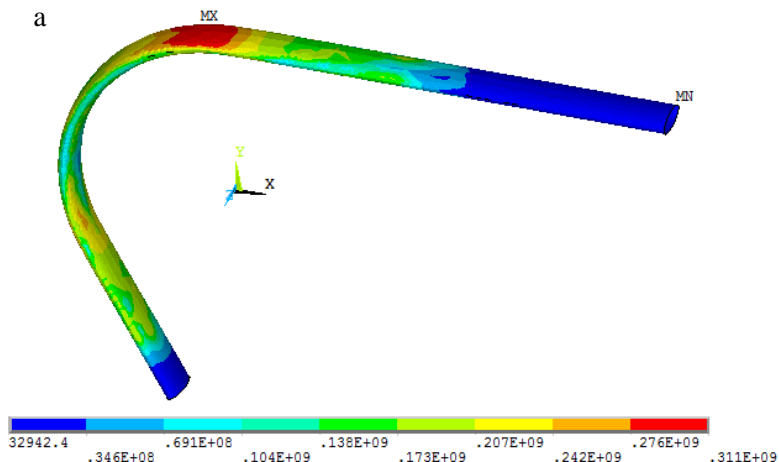


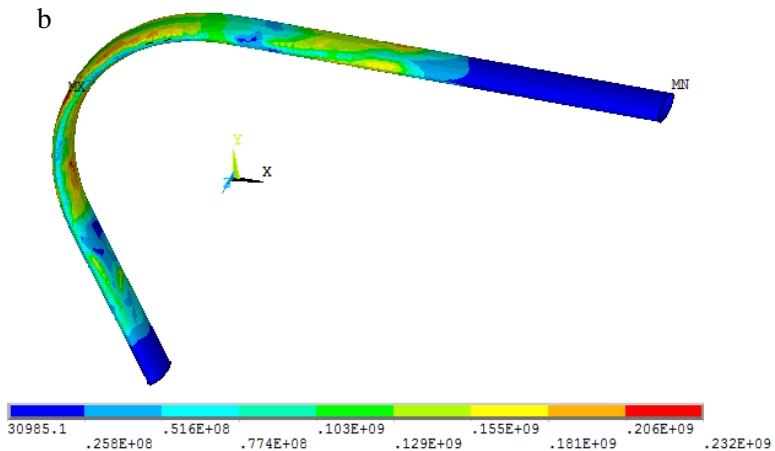
Gambar 4.21 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang Elips* dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 90 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.21 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 90 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat



kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 317 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 237 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.



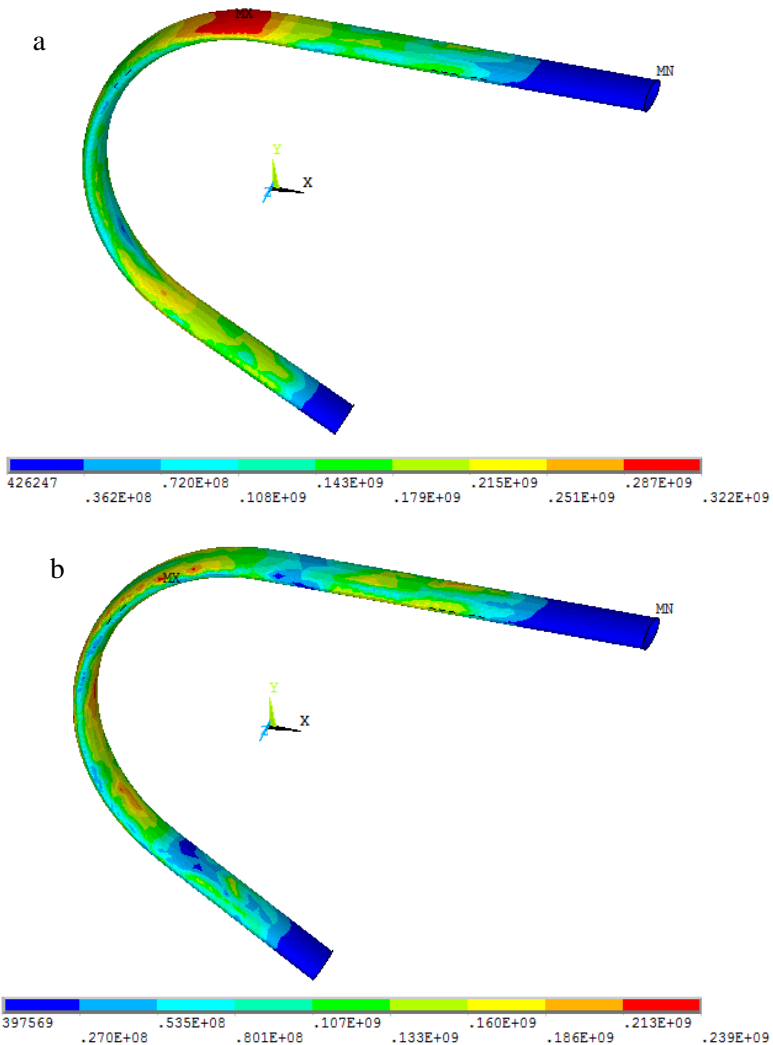


Gambar 4.22 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang Elips* dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 120 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.22 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 120 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 311 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 232 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses



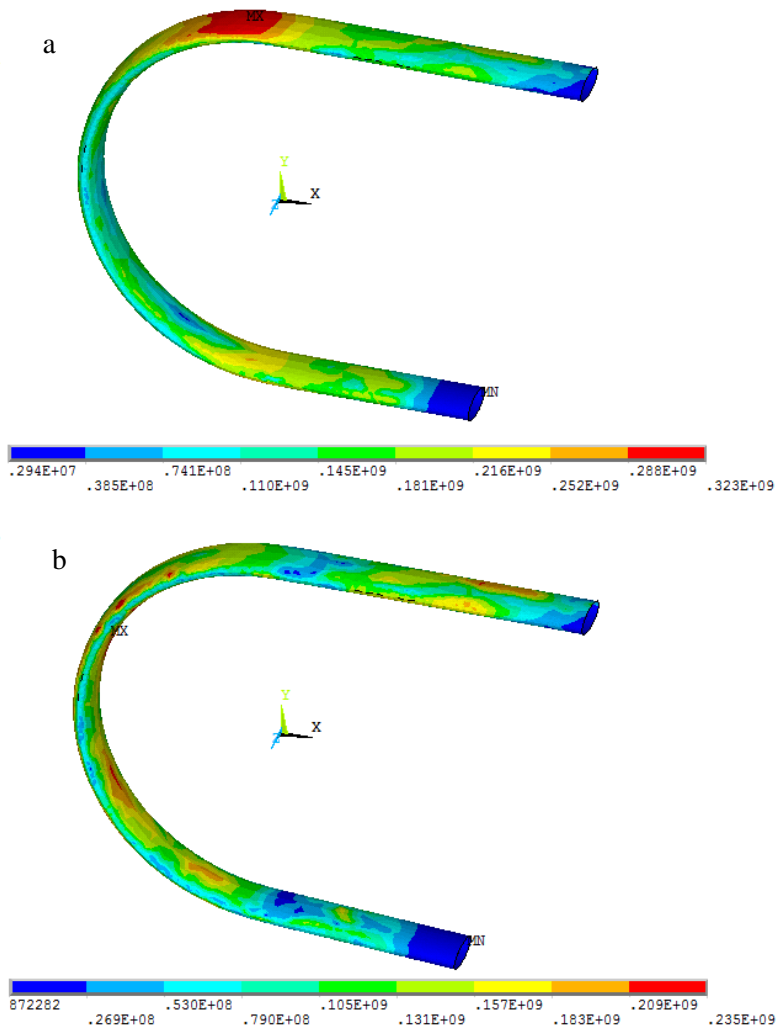
tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.





Gambar 4.23 *Von Mises Stress* pada *Tube Berpenampang Elips* dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 150 Derajat dengan Kondisi: a) *Loading* b) *Unloading*

Gambar 4.23 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 150 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 322 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 239 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.



Gambar 4.24 Von Mises Stress pada Tube Berpenampang Elips dengan Diameter Luar 40 mm pada Sudut 180 Derajat dengan Kondisi: a) Loading b) Unloading



Gambar 4.24 merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm pada sudut 180 derajat. Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 323 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 235 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

IV.3 Pengaruh Sudut *Bending* dan Geometri *Tube* terhadap Sudut *Springback* Pada *Tube* Berpenampang Lingkaran

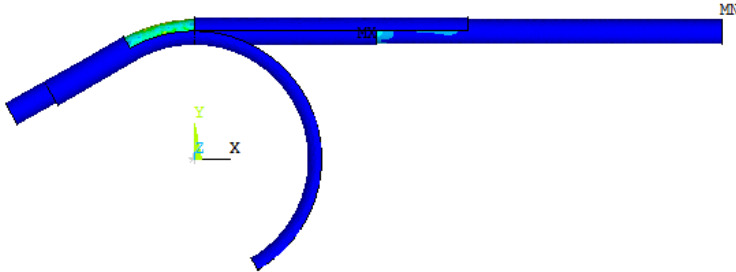
Pada Penelitian ini didapatkan hasil sudut *springback* dari hasil simulasi *tube* berpenampang lingkaran pada proses *rotary draw bending*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi pengaruh sudut *bending* dan geometri *tube* terhadap besar dari sudut *springback*. Variasi geometri yang digunakan yaitu 30 mm, 40 mm dan 50 mm dengan variasi sudut yang digunakan sebesar 30°, 60°, 90°, 120°, 150° dan 180° serta *tube* dengan penampang lingkaran untuk membandingkan sudut *springback* yang muncul dari hasil simulasi yang telah dilakukan.

IV.3.1 *Tube* Lingkaran Dengan Diameter 30 mm

Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut

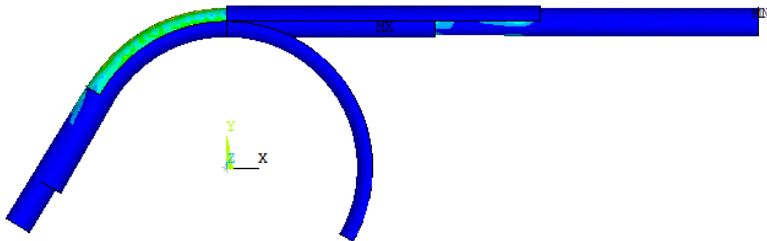


30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° didapat hasil berupa *displacement*. Hasil dari *displacement* tersebut dapat digunakan untuk mencari sudut *springback* hasil dari simulasi. Hasil sudut *springback* yang didapat dari simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil sudut *springback* yang didapat dari perhitungan.



Gambar 4.25 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 30 derajat

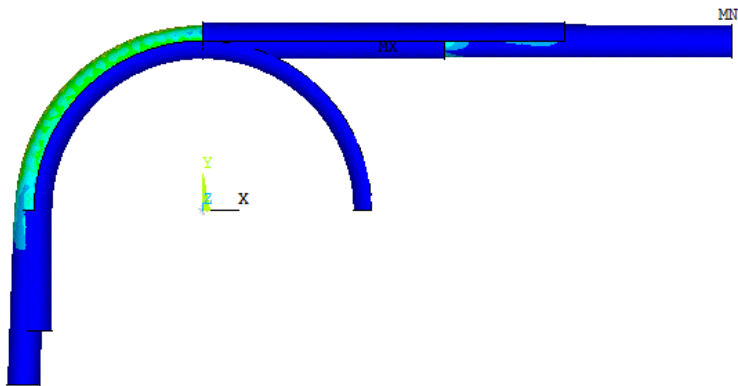
Pada Gambar 4.25 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 30 mm pada sudut 30 derajat adalah sebesar 0.865 derajat.





Gambar 4.26 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 60 derajat

Pada Gambar 4.26 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 30 mm pada sudut 60 derajat adalah sebesar 1.54 derajat.

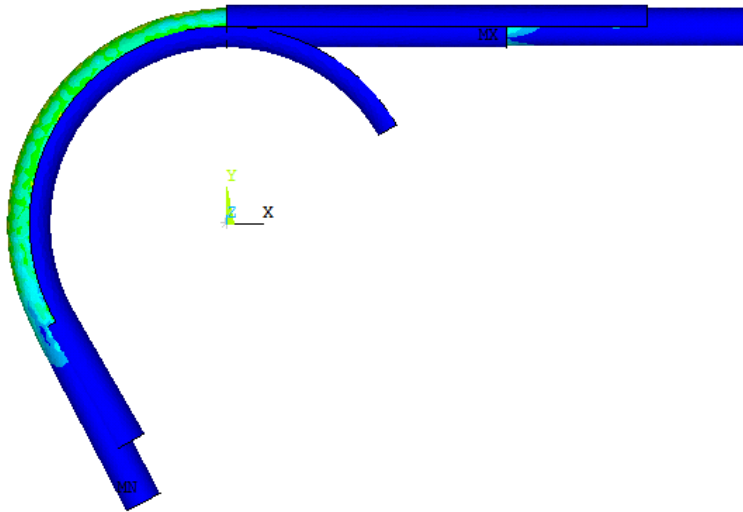


Gambar 4.27 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 90 derajat

Pada Gambar 4.27 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube*

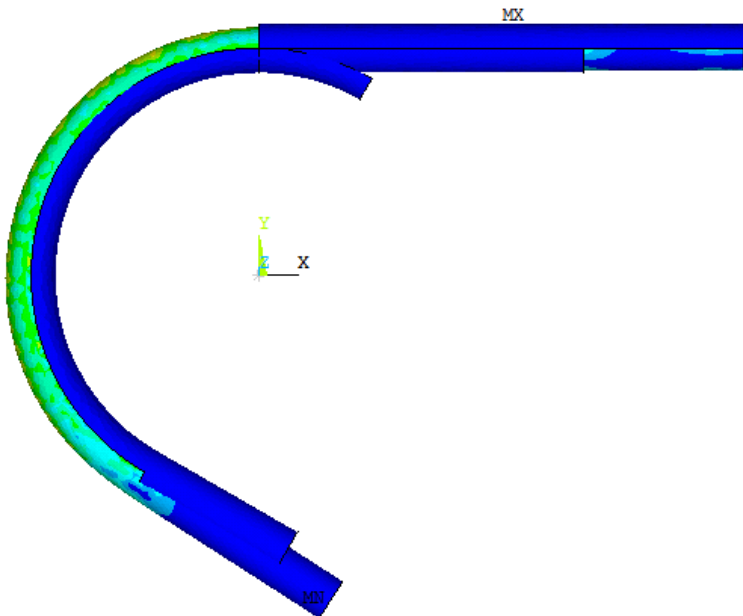


berpenampang lingkaran dengan diameter 30 mm pada sudut 90 derajat adalah sebesar 2.137 derajat.



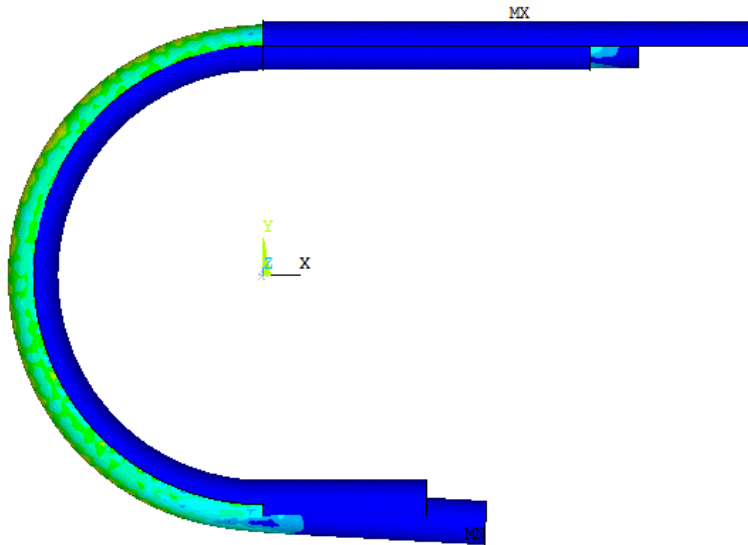
Gambar 4.28 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 120 derajat

Pada Gambar 4.28 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 30 mm pada sudut 120 derajat adalah sebesar 2.469 derajat.



Gambar 4.29 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 150 derajat

Pada Gambar 4.29 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 30 mm pada sudut 150 derajat adalah sebesar 2.744 derajat.



Gambar 4.30 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm dengan Sudut 180 derajat

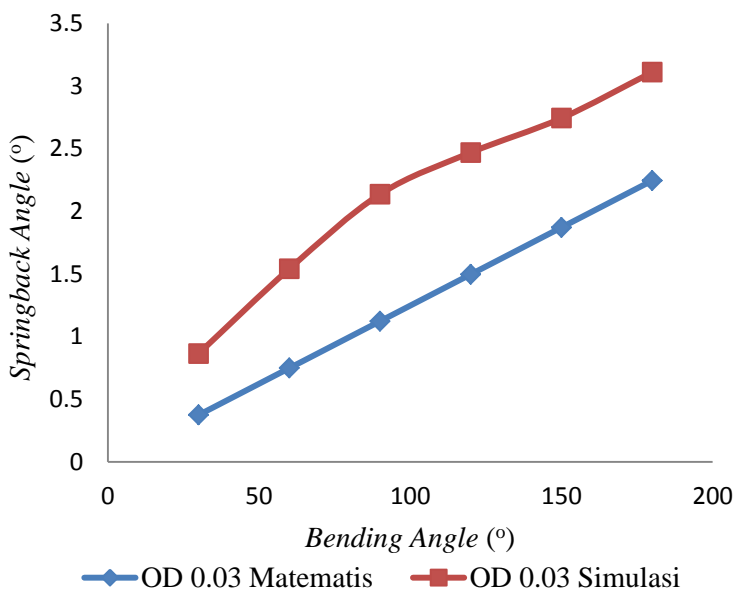
Pada Gambar 4.30 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 30 mm pada sudut 180 derajat adalah sebesar 3.111 derajat.

sudut *springback* yang didapat dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 30 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° dapat dibandingkan dengan sudut *springback* yang didapat dari perhitungan matematis. Perbandingan hasil dari sudut *springback* yang didapatkan dari simulasi dan perhitungan matematis dapat dilihat pada Tabel 4.3.



Tabel 4.3 Besar Sudut *Springback* pada *Tube Berpenampang Lingkaran* dengan Diameter 30 mm

sudut	Matematis	Simulasi
30	0.374283951	0.86452316
60	0.748567901	1.5411162
90	1.122851852	2.1369221
120	1.497135802	2.469167
150	1.871419753	2.744117
180	2.245703704	3.11074



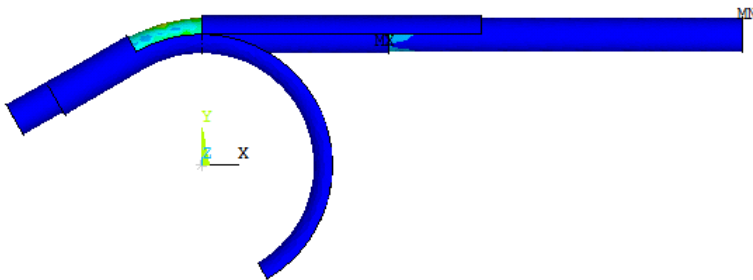
Gambar 4.31 Grafik Besar Sudut *Springback* pada *Tube Berpenampang Lingkaran* dengan Diameter 30 mm



Pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.31 dapat dilihat perbandingan antara sudut *springback* yang diperoleh dari hasil simulasi dan sudut *springback* yang diperoleh dari hasil perhitungan matematis. Dari hasil tersebut menunjukkan adanya penambahan besar sudut *springback* pada setiap kenaikan sudut *bending*. Hasil ini sesuai dengan apa yang dikatakan oleh (Zhan, 2016) bahwa sudut *springback* akan semakin besar seiring dengan naiknya sudut *bending*.

IV.3.2 Tube Lingkaran Dengan Diameter 40 mm

Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , dan 180° didapat hasil berupa *displacement*. Hasil dari *displacement* tersebut dapat digunakan untuk mencari sudut *springback* hasil dari simulasi. Hasil sudut *springback* yang didapat dari simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil sudut *springback* yang didapat dari perhitungan.

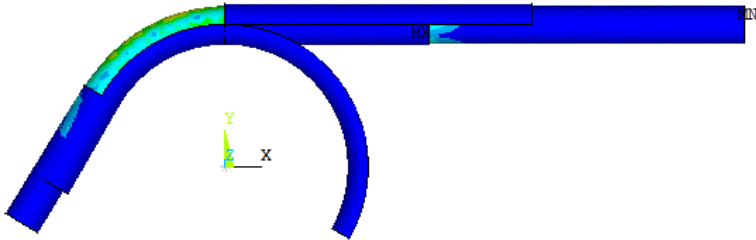


Gambar 4.32 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 30 derajat

Pada Gambar 4.32 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat

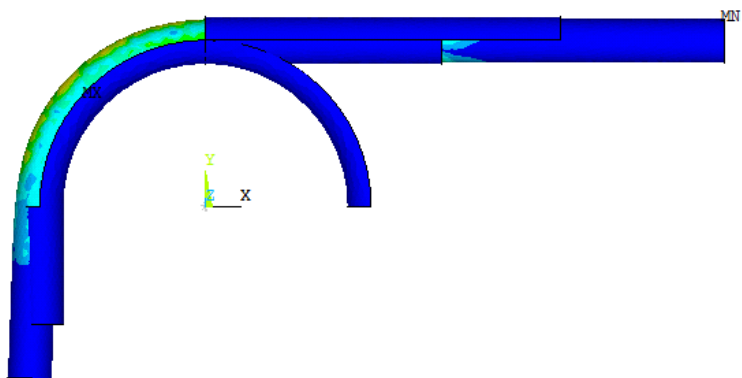


diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 40 mm pada sudut 30 derajat adalah sebesar 0.793 derajat.



Gambar 4.33 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 60 derajat

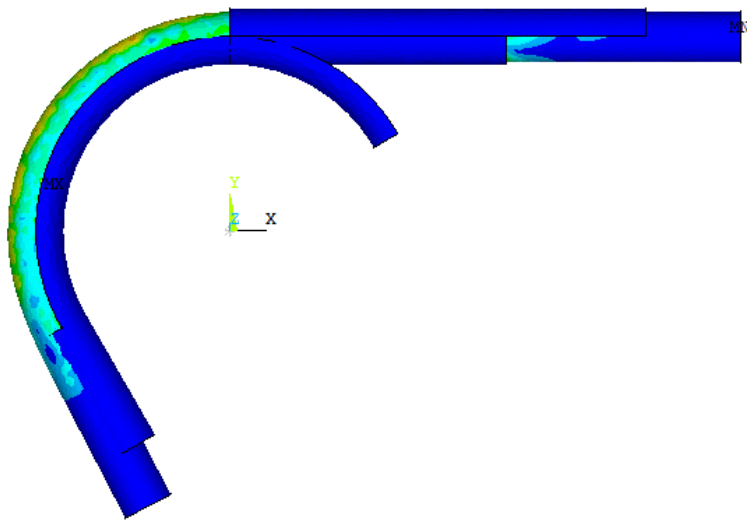
Pada Gambar 4.33 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 40 mm pada sudut 60 derajat adalah sebesar 1.398 derajat.





Gambar 4.34 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 90 derajat

Pada Gambar 4.34 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 40 mm pada sudut 90 derajat adalah sebesar 2.034 derajat.

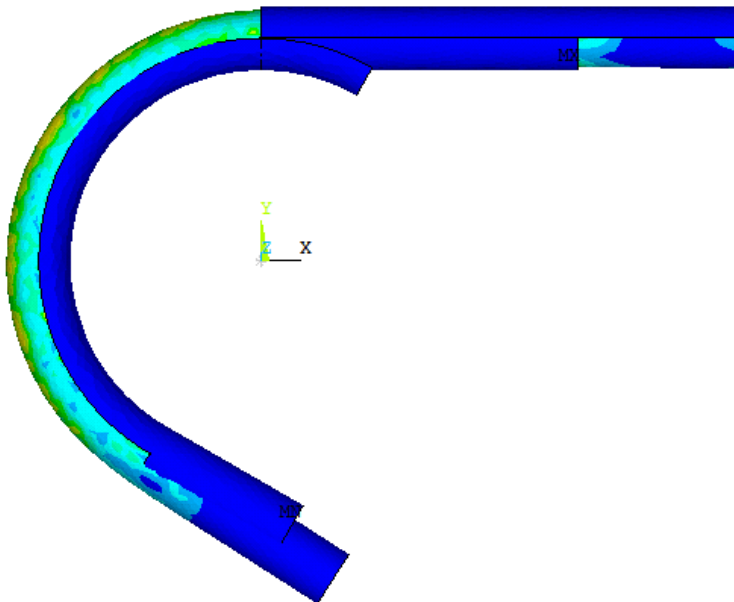


Gambar 4.35 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 120 derajat

Pada Gambar 4.35 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi



perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 40 mm pada sudut 120 derajat adalah sebesar 2.458 derajat.

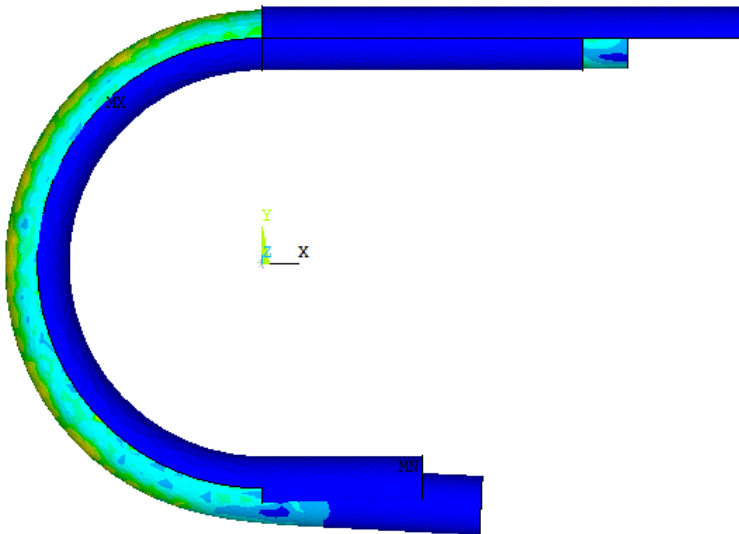


Gambar 4.36 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 150 derajat

Pada Gambar 4.36 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat



diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 40 mm pada sudut 150 derajat adalah sebesar 2.6696 derajat.



Gambar 4.37 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm dengan Sudut 180 derajat

Pada Gambar 4.37 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 40 mm pada sudut 180 derajat adalah sebesar 2.979 derajat.

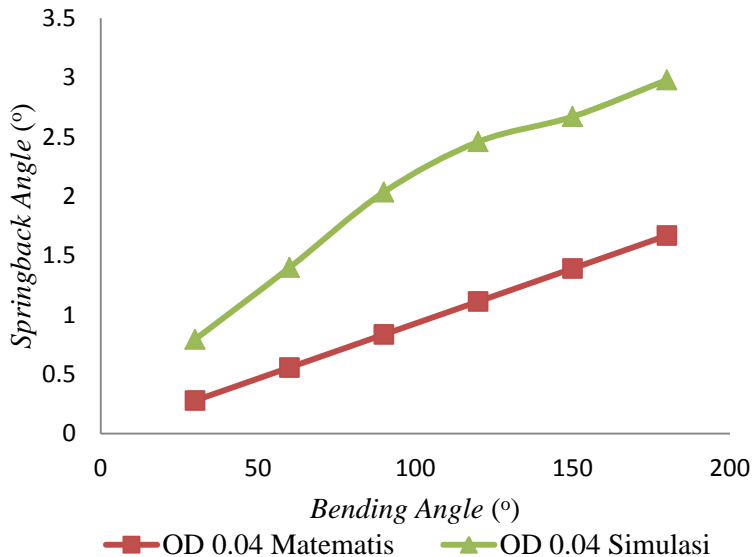
sudut *springback* yang didapat dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki



diameter luar sebesar 40 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° dapat dibandingkan dengan sudut *springback* yang didapat dari perhitungan matematis. Perbandingan hasil dari sudut *springback* yang didapatkan dari simulasi dan perhitungan matematis dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Besar Sudut *Springback* pada Tube Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm

Sudut	Matematis	Simulasi
30	0.278087793	0.79290344
60	0.556175587	1.3978767
90	0.83426338	2.0337897
120	1.112351174	2.457708
150	1.390438967	2.669633
180	1.668526761	2.97896



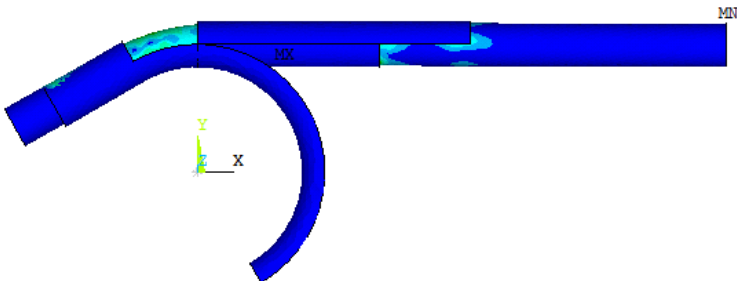


Gambar 4.38 Grafik Besar Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 40 mm

Pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.38 dapat dilihat perbandingan antara sudut *springback* yang diperoleh dari hasil simulasi dan sudut *springback* yang diperoleh dari hasil perhitungan matematis. Dari hasil tersebut menunjukkan adanya penambahan besar sudut *springback* pada setiap kenaikan sudut *bending*. Hasil ini sesuai dengan apa yang dikatakan oleh (Zhan, 2016) bahwa sudut *springback* akan semakin besar seiring dengan naiknya sudut *bending*.

IV.3.3 *Tube* Lingkaran Dengan Diameter 50 mm

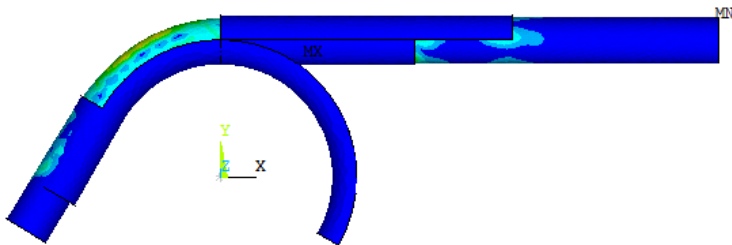
Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° didapat hasil berupa *displacement*. Hasil dari *displacement* tersebut dapat digunakan untuk mencari sudut *springback* hasil dari simulasi. Hasil sudut *springback* yang didapat dari simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil sudut *springback* yang didapat dari perhitungan.



Gambar 4.39 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm dengan Sudut 30 derajat

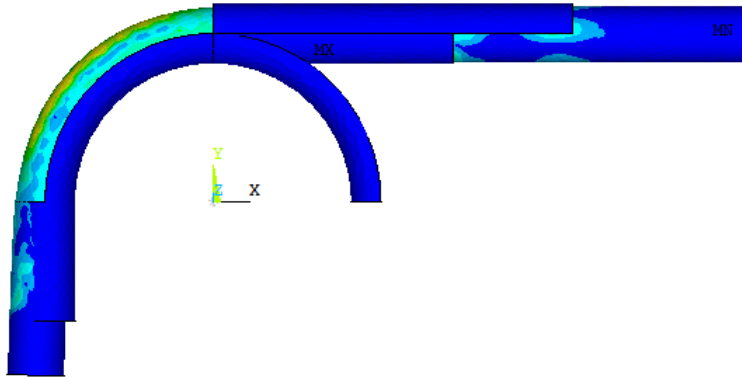


Pada Gambar 4.39 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 50 mm pada sudut 30 derajat adalah sebesar 0.739 derajat.



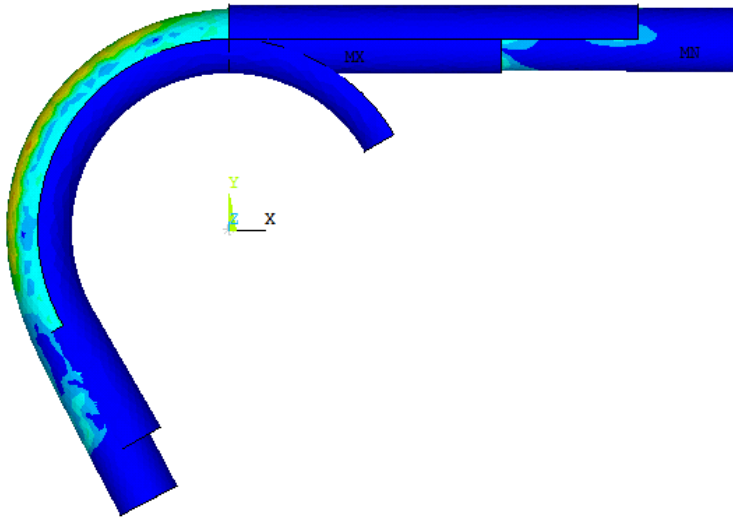
Gambar 4.40 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran Diameter 50 mm dengan Sudut 60 derajat

Pada Gambar 4.40 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 50 mm pada sudut 60 derajat adalah sebesar 1.295 derajat.



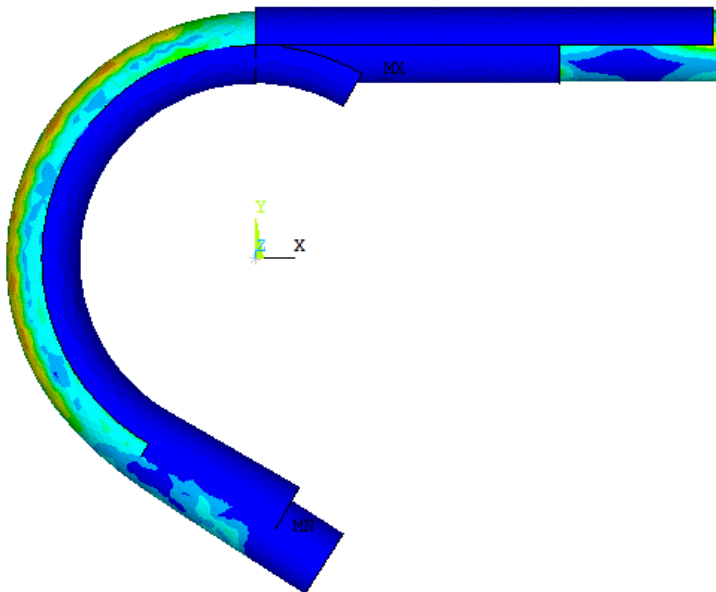
Gambar 4.41 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran Diameter 50 mm dengan Sudut 90 derajat

Pada Gambar 4.41 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 50 mm pada sudut 90 derajat adalah sebesar 1.885 derajat.



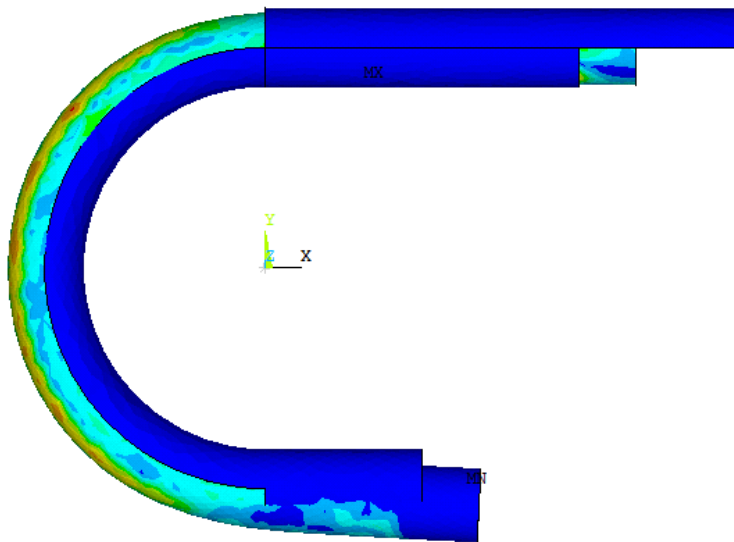
Gambar 4.42 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran Diameter 50 mm dengan Sudut 120 derajat

Pada Gambar 4.42 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 50 mm pada sudut 120 derajat adalah sebesar 2.292 derajat.



Gambar 4.43 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran Diameter 50 mm dengan Sudut 150 derajat

Pada Gambar 4.43 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 50 mm pada sudut 150 derajat adalah sebesar 2.601 derajat.



Gambar 4.44 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran Diameter 50 mm dengan Sudut 180 derajat

Pada Gambar 4.44 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang lingkaran dengan diameter 50 mm pada sudut 180 derajat adalah sebesar 2.927 derajat.

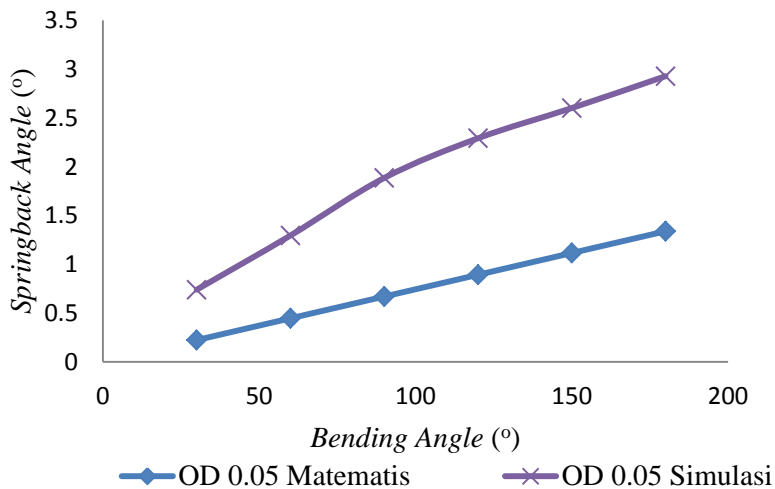
sudut *springback* yang didapat dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° dapat dibandingkan dengan sudut *springback* yang didapat dari perhitungan matematis.



Perbandingan hasil dari sudut *springback* yang didapatkan dari simulasi dan perhitungan matematis dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Besar Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 50 mm

sudut	Matematis	Eksperimen
30	0.223052512	0.7390454
60	0.446105025	1.2947443
90	0.669157537	1.8848207
120	0.89221005	2.291551
150	1.115262562	2.600878
180	1.338315075	2.927393



Gambar 4.45 Grafik Besar Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran Diameter 50 mm

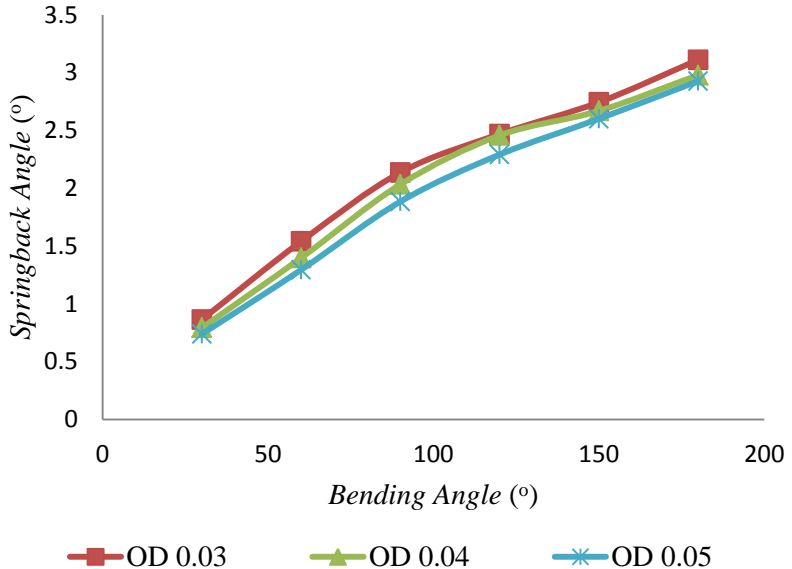
Pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.45 dapat dilihat perbandingan antara sudut *springback* yang diperoleh dari hasil simulasi dan sudut *springback* yang diperoleh dari hasil perhitungan



matematis. Dari hasil tersebut menunjukkan adanya penambahan besar sudut *springback* pada setiap kenaikan sudut *bending*. Hasil ini sesuai dengan apa yang dikatakan oleh (Zhan, 2016) bahwa sudut *springback* akan semakin besar seiring dengan naiknya sudut *bending*.

Tabel 4.6 Besar Sudut *Springback* pada *Tube Berpenampang* Lingkaran dengan Diameter 30 mm, 40 mm dan 50 mm

OD 30 mm	OD 40 mm	OD 50 mm
0.86452316	0.79290344	0.7390454
1.5411162	1.3978767	1.2947443
2.1369221	2.0337897	1.8848207
2.469167	2.457708	2.291551
2.744117	2.669633	2.600878
3.11074	2.97896	2.927393





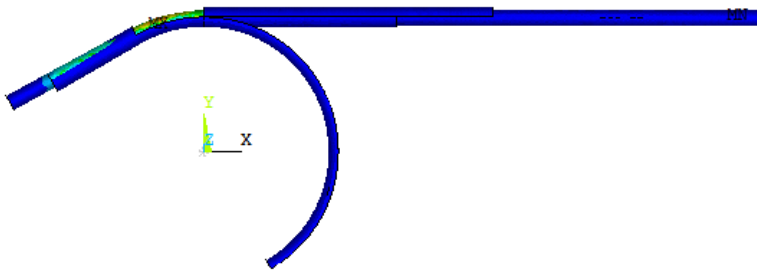
Gambar 4.46 Grafik Besar Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dengan Diameter 30 mm, 40 mm, dan 50 mm

Pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.46 dapat dilihat perbandingan antara sudut *springback* dari geometri 30 mm, 40 mm dan 50 mm. Dari hasil dapat dilihat perbandingan antara sudut *springback* yang diperoleh dari hasil simulasi. Dari hasil tersebut menunjukkan adanya penambahan besar sudut *springback* pada setiap kenaikan besar diameter luar *tube*. Hasil ini sesuai dengan apa yang disebutkan oleh (Zhan, 2016) bahwa besar sudut *springback* akan turun seiring dengan naiknya diameter luar dari *tube*.

IV.4 Pengaruh Sudut *Bending* terhadap Sudut *Springback* Pada *Tube* Berpenampang Elips

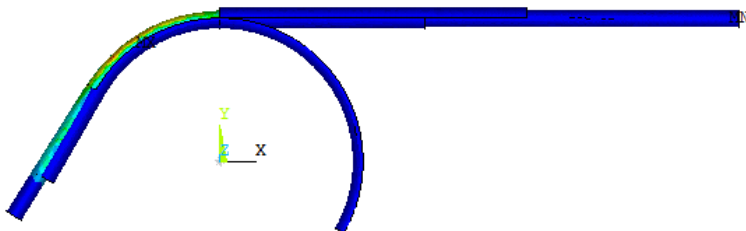
Pada Penelitian ini didapatkan hasil sudut *springback* dari hasil simulasi *tube* berpenampang elips pada proses *rotary draw bending*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi pengaruh sudut *bending* terhadap besar dari sudut *springback*. Variasi sudut yang digunakan sebesar 30°, 60°, 90°, 120°, 150° dan 180° serta *tube* dengan penampang elips untuk membandingkan sudut *springback* yang muncul dari hasil simulasi yang telah dilakukan.

Hasil dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang elips yang memiliki diameter luar sebesar 40 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° didapat hasil berupa *displacement*. Hasil dari *displacement* tersebut dapat digunakan untuk mencari sudut *springback* hasil dari simulasi. Hasil sudut *springback* yang didapat dari simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil sudut *springback* yang didapat dari perhitungan.



Gambar 4.47 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 30 derajat

Pada Gambar 4.47 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang elips dengan diameter 40 mm pada sudut 30 derajat adalah sebesar 1.344 derajat.

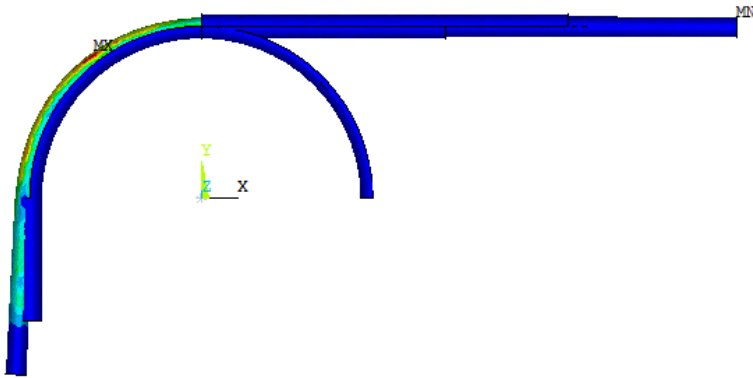


Gambar 4.48 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 60 derajat

Pada Gambar 4.48 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube*

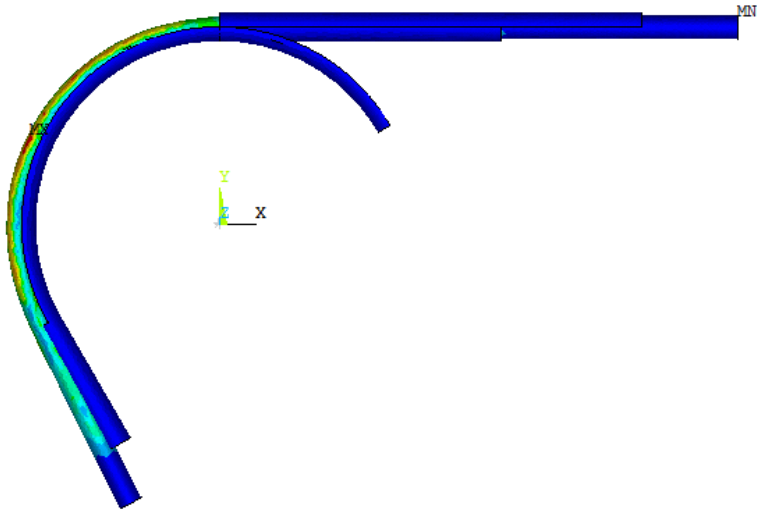


yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang elips dengan diameter 40 mm pada sudut 60 derajat adalah sebesar 2.068 derajat.



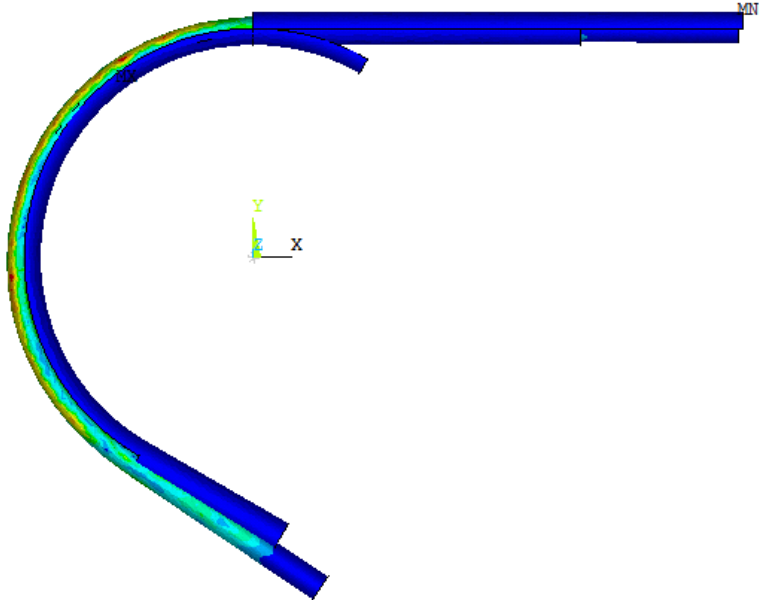
Gambar 4.49 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 90 derajat

Pada Gambar 4.49 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang elips dengan diameter 40 mm pada sudut 90 derajat adalah sebesar 2.790 derajat.



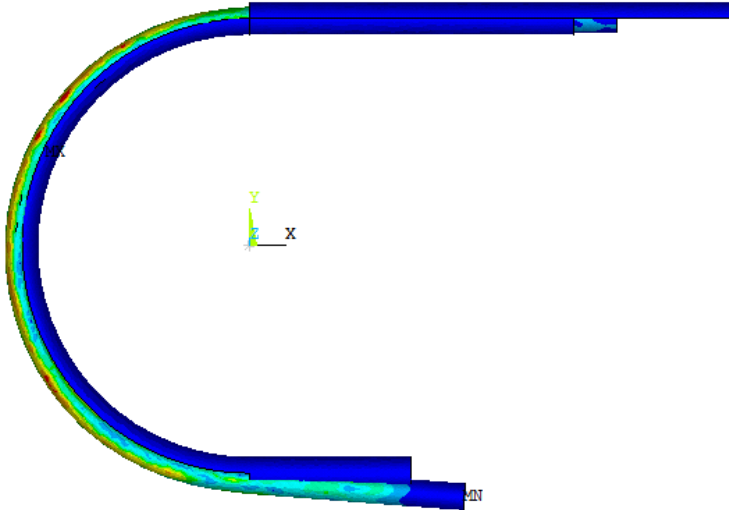
Gambar 4.50 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 120 derajat

Pada Gambar 4.50 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback tube* berpenampang elips dengan diameter 40 mm pada sudut 120 derajat adalah sebesar 3.346 derajat.



Gambar 4.51 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 150 derajat

Pada Gambar 4.51 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang elips dengan diameter 40 mm pada sudut 150 derajat adalah sebesar 3.787 derajat.



Gambar 4.52 Hasil Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips dengan Sudut 180 derajat

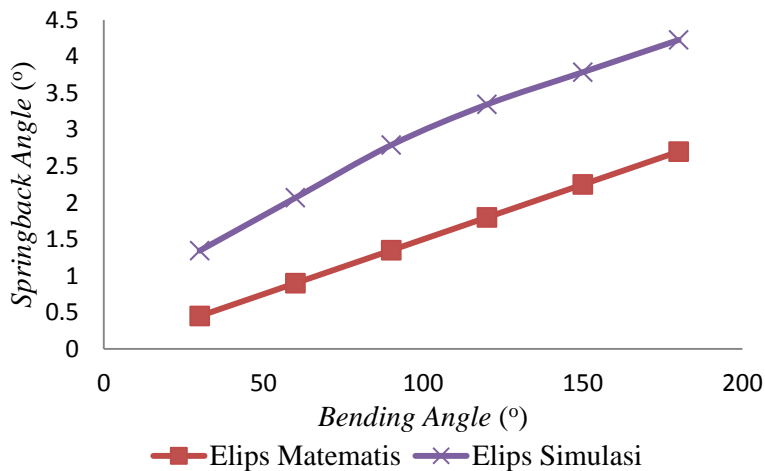
Pada Gambar 4.52 dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback* *tube* berpenampang elips dengan diameter 40 mm pada sudut 180 derajat adalah sebesar 4.228 derajat.

sudut *springback* yang didapat dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada *tube* berpenampang lingkaran yang memiliki diameter luar sebesar 50 mm dengan ketebalan 3 mm pada sudut 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180° dapat dibandingkan dengan sudut *springback* yang didapat dari perhitungan matematis. Perbandingan hasil dari sudut *springback* yang didapatkan dari simulasi dan perhitungan matematis dapat dilihat pada Tabel 4.7.



Tabel 4.7 Besar Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips

sudut	matematis	simulasi
30	0.45	1.3440888
60	0.9	2.0682373
90	1.35	2.790094
120	1.8	3.34579
150	2.25	3.7869003
180	2.7	4.228008



Gambar 4.53 Grafik Besar Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Elips

Pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.53 dapat dilihat perbandingan antara sudut *springback* dari geometri tube 40 mm dengan sudut *bending* 30°, 60°, 90°, 120°, 150° dan 180°. Dari hasil dapat dilihat perbandingan antara sudut *springback* yang diperoleh dari hasil simulasi dan sudut *springback* yang diperoleh dari hasil



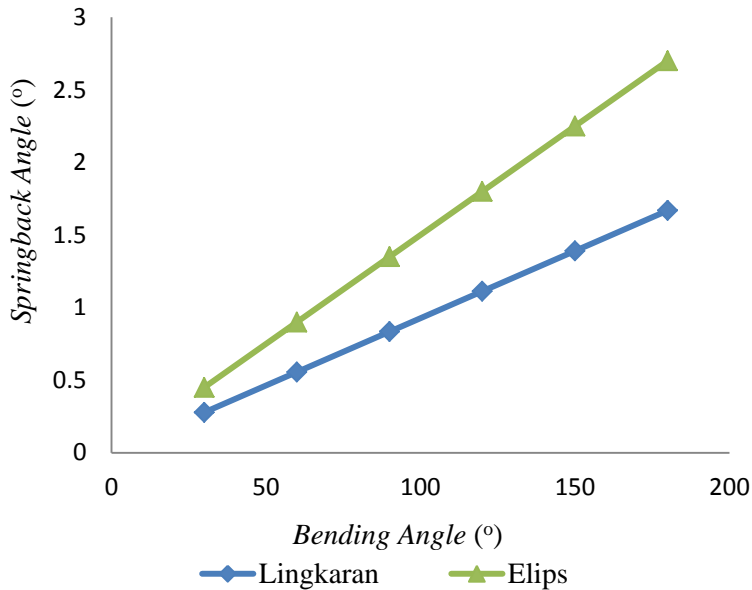
perhitungan matematis. Dari hasil tersebut menunjukkan adanya penambahan besar sudut *springback* pada setiap kenaikan besar sudut *bending*.

IV.5 Pengaruh Penampang terhadap Sudut *Springback* Pada *Tube*

Dari simulasi dan perhitungan matematis yang telah dilakukan pada *tube* dengan penampang lingkaran dan elips didapatkan sudut *springback* untuk masing-masing penampang. Dari hasil perhitungan matematis didapatkan sudut *springback* yang dimiliki oleh *tube* dengan penampang lingkaran lebih kecil dibandingkan dengan *tube* dengan penampang elips. Perbandingan sudut *springback* hasil perhitungan matematis dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.54.

Tabel 4.8 Perbandingan Perhitungan Matematis Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dan *Tube* Berpenampang Elips

	<i>Tube</i> lingkaran	<i>Tube</i> Elips
sudut	Springback	springback
30	0.278087793	0.45
60	0.556175587	0.9
90	0.83426338	1.35
120	1.112351174	1.8
150	1.390438967	2.25
180	1.668526761	2.7



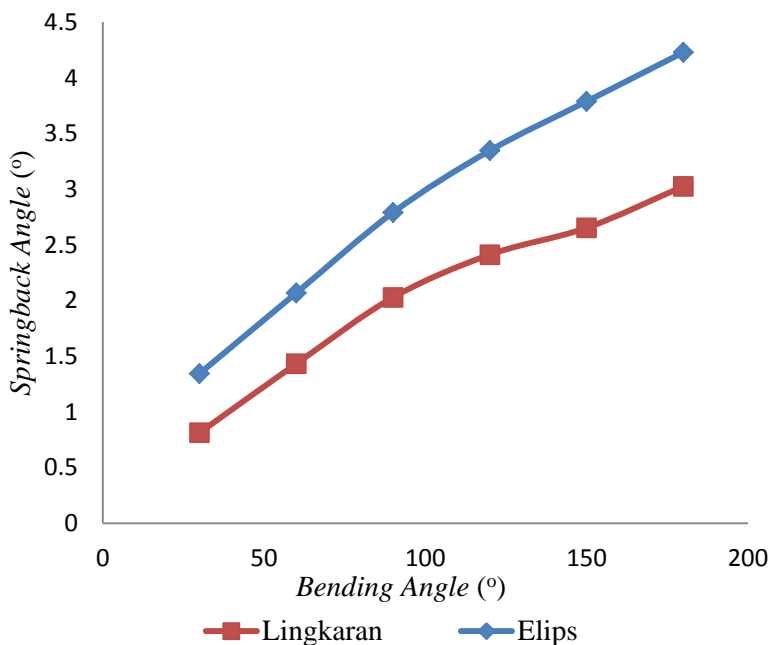
Gambar 4.54 Grafik Perbandingan Perhitungan Matematis Sudut *Springback* pada *Tube* Berpenampang Lingkaran dan *Tube* Berpenampang Elips

Dari hasil simulasi didapatkan sudut *springback* yang dimiliki oleh *tube* dengan penampang lingkaran lebih kecil dibandingkan dengan *tube* dengan penampang elips. Perbandingan sudut *springback* hasil perhitungan matematis dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.55.



Tabel 4.9 Perbandingan Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube Berpenampang Lingkaran* dan *Tube Berpenampang Elips*

	<i>Tube</i> lingkaran	<i>Tube</i> Elips
sudut	Springback	springback
30	0.812956958	1.344088834
60	1.432254182	2.0682373
90	2.0280601	2.790094
120	2.4118717	3.34579
150	2.652444	3.7869003
180	3.024796	4.228008



Gambar 4.55 Grafik Perbandingan Simulasi Sudut *Springback* pada *Tube Berpenampang Lingkaran* dan *Tube Berpenampang Elips*



Perbandingan besar sudut *springback* yang terdapat pada *tube* berpenampang lingkaran dan *tube* berpenampang elips dapat dilihat dengan menggunakan (Al-Qureshi, 2002) rasio ρ_o/ρ_f dimana ρ_f adalah sudut *bending* dan ρ_o adalah sudut akhir yang terjadi setelah dilakukan *unloading* pada proses *bending*. Saat $\rho_o/\rho_f = 0$ maka proses *bending* seluruhnya elastis dan saat $\rho_o/\rho_f = 1$ maka proses *bending* seluruhnya plastis atau dapat dikatakan tidak terjadi *springback* pada proses *bending* tersebut. Setelah dilakukan perhitungan rasio ρ_o/ρ_f , hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4.10. dan Tabel 4.11

Tabel 4.10 Rasio ρ_o/ρ_f pada *Tube* Berpenampang Lingkaran

Sudut Bending	Sudut Akhir	ρ_o/ρ_f
30	29.20709656	0.97357
60	58.6021233	0.976702
90	87.9662103	0.977402
120	117.542292	0.979519
150	147.330367	0.982202
180	177.02104	0.98345



Tabel 4.11 Rasio ρ_o/ρ_f pada *Tube* Berpenampang Elips

Sudut Bending	Sudut akhir	ρ_o/ρ_f
30	28.65591117	0.95519704
60	57.9317627	0.96552938
90	87.209906	0.96899896
120	116.65421	0.97211842
150	146.2130997	0.974754
180	175.771992	0.97651107

Dari data rasio yang diperoleh pada Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 dapat dilihat bahwa rasio ρ_o/ρ_f yang dimiliki oleh *tube* berpenampang elips lebih mendekati $\rho_o/\rho_f = 0$ atau dapat dikatakan bahwa *tube* dengan penampang elips memiliki lebih banyak daerah elastis. Sedangkan rasio ρ_o/ρ_f yang dimiliki oleh *tube* berpenampang lingkaran lebih mendekati $\rho_o/\rho_f = 1$ atau dapat dikatakan bahwa *tube* dengan penampang lingkaran memiliki lebih banyak daerah plastis. Dari perbandingan ini maka dapat ditarik kesimpulan bahwa sudut *springback* yang dimiliki oleh *tube* berpenampang elips lebih besar dibandingkan dengan sudut *springback* yang dimiliki oleh *tube* berpenampang lingkaran.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan penelitian:

- i. Besar sudut springback yang dialami oleh elips lebih besar daripada besar sudut springback yang dialami oleh lingkaran. Hal ini dapat dilihat dari rasio ρ_o/ρ_f yang dimiliki oleh *tube* berpenampang elips lebih mendekati $\rho_o/\rho_f = 0$ atau dapat dikatakan bahwa *tube* dengan penampang elips memiliki lebih banyak daerah elastis. Sedangkan rasio ρ_o/ρ_f yang dimiliki oleh *tube* berpenampang lingkaran lebih mendekati $\rho_o/\rho_f = 1$ atau dapat dikatakan bahwa *tube* dengan penampang lingkaran memiliki lebih banyak daerah plastis.
- ii. Semakin besar sudut *bending* maka semakin besar sudut *springback* yang terjadi pada *tube* dengan penampang lingkaran, dan sebaliknya semakin kecil sudut *bending* maka semakin kecil sudut *springback*.
- iii. Semakin kecil diameter *tube* yang mengalami proses *bending* maka akan semakin besar sudut springback yang dihasilkan pada *tube* berpenampang lingkaran, dan semakin besar diameter *tube* maka akan semakin kecil sudut *springback* yang dihasilkan.
- iv. Semakin besar sudut *bending* maka semakin besar sudut *springback* yang terjadi pada *tube* dengan penampang elips dan semakin kecil sudut *bending* maka semakin kecil sudut *springback*.

V.2 Saran

Saran yang dapat digunakan untuk penelitian berikutnya adalah:



-
- i. Melakukan eksperimen prorses dari *rotary draw bending* pada *tube* agar hasil dari simulasi dan perhitungan dapat divalidasikan
 - ii. Membuat simulasi lainnya dengan menggunakan mandrel untuk melihat variasi hasil lainnya

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Qureshi, H.A., A. Russo, June 2001. "Spring-back and Residual Stresses in Bending of Thin-Walled Aluminium Tubes". **Materials and Design** 23 (2002) 217-222
- Ashby, Michael F. 2005. **Materials Selection in Mechanical Design**. ELSEVIER
- Callister Jr., William D. 2007. **Materials Science and Engineering An Introduction**. John Wiley & Sons, Inc.
- Gardner, L., T.M, Chan and J.M. Abela, 2011. "Structural Behaviour of Elliptical Hollow Sections Under Combined Compression and Uniaxial Bending". **Advanced Steel Construction** Vol. 7, No. 1, pp. 86-112 (2011)
- Gu, R.J., H. Yang, M. Zhan, H. Li, H.W. Li, September 2007. "Research on the Springback of Thin-Walled Tube NC Bending Based on the Numerical Solution of the Whole Process". **Computational Materials Science** 42 (2008) 537-549
- Khodayari, G., 2008. "Pre-forming: Tube Rotary Draw Bending and Pre-flattening/Crushing in Hydroforming". **Hydroforming for Advanced Manufacturing**
- Miller, Gregory. 2003. **Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide**. Michigan: Society of Manufacturing Engineers
- Murata, M., T. Kuboki, K. Takahashi, M. Goodarzi, Y. Jin, 2008. "Effect of Hardening Exponent on Tube Bending". **Journal of Materials Processing Technology** 201 (2008) I89-I92
- Paulsen, Frode, Torgeir Welo, January 1995. "Application of Numerical Simulation in the Bending of Aluminium-Alloy Profiles". **Journal of Materials Processing Technology** 58 (1996) 274-285
- Thorat, Sandeep, Jatin Rajpal, Basavraj S. Kothavale, April 2015. "Finite Element Analysis and Mathematical Calculation of Spring Back in Rotary Draw Tube Bending". (**IJTR**)

International Journal of Innovative Technology and Research Volume No. 3, Issue No. 3, April – May 2015, 2086 – 2100

- Wen, T., September 2013. “On a New Concept of Rotary Draw Bend-die Adaptable for Bending Tubes with Multiple Outer Diameters Under Non-Mandrel Condition”. **Journal of Materials Processing Technology** 214 (2014) 311 – 317
- Yang, H., H. Li, M. Zhan, August 2010. “Friction Role in Bending Behaviors of Thin-Walled Tube in Rotary-Draw-Bending Under Small Bending Radii”. **Journal of Materials Processing Technology** 210 (2010) 2273 – 2284
- Yang, He, Li Heng, Zhang Zhiyong, Zhan Mei, Liu Jing, Li Guanjin, September 2011. “Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies”. **Chinese Journal of Aeronautics** 25 (2012) 1-12
- Zhan, Mei, He Yang, Liang Huang, Ruijie Gu, March 2006. “Springback Analysis of Numerical Control Bending of Thin-Walled Tube Using Numerical-Analytic Method”. **Journal of Materials Processing Technology** 177 (2006) 197-201
- Zhan, M., T. Huang, P.P. Zhang, H. Yang, July 2013. “Variation of Young’s Modulus of High-Strength TA18 Tubes and Its Effects on Forming Quality of Tubes by Numerical Control Bending”. **Materials and Design** 53 (2014) 809-815
- Zhan, Mei, Yan Wang, He Yang, Hui Long, May 2016. “An Analytic Model for Tube Bending Springback Considering Different Parameter Variations of Ti-Alloy Tubes”. **Journal of Materials Processing Technology** 236 (2016) 123-137

LAMPIRAN

1. Gambar Alat *Rotary Draw Bending*



Gambar 1. W27YPC – 63 Tube Bender (Gu, 2008)

2. Komponen Pada *Rotary Draw Bending*



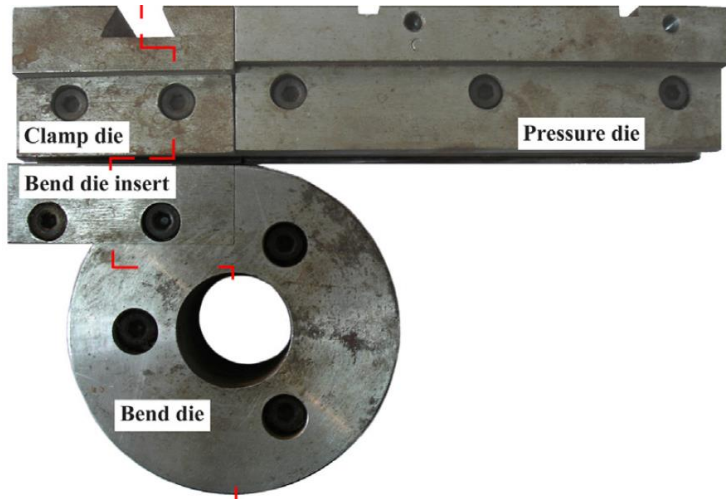
Gambar 2. Bend Die (Thorat, 2015)



Gambar 3 *Pressure Die* (Thorat, 2015)



Gambar 4 *Wiper Die* (Thorat, 2015)



Gambar 5 *Assembly Komponen Rotary Draw Bending* (Wen, 2014)

3. Pembuatan Geometri Dalam *Software*

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,LSDYNA,0
/GO
```

```
/PREP7
ET,1,SHELL181
KEYOPT,1,8,2
```

R,1,0.003,0.003,0.003,0.003, ,

!pipe thickness $t=3$ mm

MP,EX,1,196E9 !modulusyoung
MP,PRXY,1,0.3 !poissonratio
MP,DENS,1,7850 !density

TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,210E6,149.36E7,,,

!bend die and clamp
k,1,0,0,0
k,2,0,-0.12,0
k,3,0,-0.14,0.02
k,4,0,-0.14,-0.02

k,5,0.12,0,0
k,6,0.14,0,0.02
k,7,0.14,0,-0.02

k,8,0,0.12,0
k,9,0,0.14,0.02
k,10,0,0.14,-0.02

k,11,-0.1,0.12,0
k,12,-0.1,0.14,0.02
k,13,-0.1,0.14,-0.02

k,14,-0.1,0.16,0
k,15,0,0.16,0

k,16,-0.1,0.14,0

k,17,0,0.14,0

k,18,0.14,0,0

k,19,0,-0.14,0

k,20,0,0,0.02

k,21,0,0,-0.02

larc,11,12,16,0.02 !1

larc,12,14,16,0.02 !2

larc,14,13,16,0.02 !3

larc,13,11,16,0.02 !4

larc,8,9,17,0.02 !5

larc,9,15,17,0.02 !6

larc,15,10,17,0.02 !7

larc,10,8,17,0.02 !8

larc,6,5,18,0.02 !9

larc,5,7,18,0.02 !10

larc,3,2,19,0.02 !11

larc,2,4,19,0.02 !12

!oval clamp 1

FLST,2,4,4,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-4

LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1

FLST,3,4,4,ORDE,2

FITEM,3,1

FITEM,3,-4

LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

!oval clamp 2

FLST,2,4,4,ORDE,2

FITEM,2,5

FITEM,2,-8

LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1

FLST,3,4,4,ORDE,2

FITEM,3,5
FITEM,3,-8
LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

!bend die
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,9
FITEM,2,-10
LSSCALE,P51X, , ,0.5,1,1, ,1,1
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,9
FITEM,3,-10
LGEN, ,P51X, , ,0.07, , , ,1

!bend die
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,11
FITEM,2,-12
LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,11
FITEM,3,-12
LGEN, ,P51X, , , , -0.07, , , ,1

larc,9,6,20,0.14 !13
larc,6,3,20,0.14 !14
larc,10,7,21,0.14 !15
larc,7,4,21,0.14 !16
larc,8,5,1,0.13 !17
larc,5,2,1,0.13 !18

GPLOT

l,12,9 !L19

l,8,11	!20
l,10,13	!21
l,14,15	!22

al,1,19,20,5
al,19,2,22,6
al,22,3,21,7
al,20,8,21,4
al,5,17,9,13
al,8,15,10,17
al,9,18,11,14
al,10,16,12,18

k,22,0,0.12,0
k,23,0,0.14,0.02
k,24,0,0.14,-0.02
k,25,0,0.14,0

k,26,0.2,0.12,0
k,27,0.2,0.14,0.02
k,28,0.2,0.14,-0.02
k,29,0.2,0.14,0

k,30,0,0.16,0

k,31,0.3,0.14,0.02
k,32,0.3,0.14,-0.02
k,33,0.3,0.16,0
k,34,0.3,0.14,0

k,35,0,0.14,0.02
k,36,0,0.14,-0.02
k,37,0,0.14,0

larc,22,23,25,0.02	!23
larc,22,24,25,0.02	!24
larc,27,26,29,0.02	!25
larc,26,28,29,0.02	!26

FLST,2,2,4,ORDE,2
 FITEM,2,23
 FITEM,2,-24
 LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
 FLST,3,2,4,ORDE,2
 FITEM,3,23
 FITEM,3,-24
 LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

FLST,2,2,4,ORDE,2
 FITEM,2,25
 FITEM,2,-26
 LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
 FLST,3,2,4,ORDE,2
 FITEM,3,25
 FITEM,3,-26
 LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

l,23,27	!27
l,22,26	!28
l,24,28	!29

al,27,23,28,25
 al,24,29,26,28

larc,35,30,37,0.02	!30
larc,30,36,37,0.02	!31
larc,31,33,34,0.02	!32
larc,33,32,34,0.02	!33

FLST,2,2,4,ORDE,2
 FITEM,2,30
 FITEM,2,-31
 LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
 FLST,2,2,4,ORDE,2
 FITEM,2,32
 FITEM,2,-33
 LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
 FLST,3,2,4,ORDE,2
 FITEM,3,30
 FITEM,3,-31
 LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1
 FLST,3,2,4,ORDE,2
 FITEM,3,32
 FITEM,3,-33
 LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

1,35,31 !34
 1,30,33 !35
 1,36,32 !36

al,30,34,32,35
 al,33,36,31,35

k,38,-0.15,0.1215,0
 k,39,-0.15,0.14,0.0185
 k,40,-0.15,0.14,-0.0185
 k,41,-0.15,0.1585,0
 k,42,-0.15,0.14,0

k,43,0.65,0.1215,0
 k,44,0.65,0.14,0.0185
 k,45,0.65,0.14,-0.0185
 k,46,0.65,0.1585,0
 k,47,0.65,0.14,0

larc,38,40,42,0.0185 !37
larc,40,41,42,0.0185 !38
larc,41,39,42,0.0185 !39
larc,39,38,42,0.0185 !40

larc,43,45,47,0.0185 !41
larc,45,46,47,0.0185 !42
larc,46,44,47,0.0185 !43
larc,44,43,47,0.0185 !44

FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,37
FITEM,2,-40
LSSCALE,P51X, , ,1,0.45,1, ,1,1
FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,41
FITEM,2,-44
LSSCALE,P51X, , ,1,0.45,1, ,1,1
FLST,3,4,4,ORDE,2
FITEM,3,37
FITEM,3,-40
LGEN, ,P51X, , , ,0.077, , , ,1
FLST,3,4,4,ORDE,2
FITEM,3,41
FITEM,3,-44
LGEN, ,P51X, , , ,0.077, , , ,1

l,40,45 !45
l,38,43 !46
l,39,44 !47
l,41,46 !48

al,43,47,48,39
al,38,48,42,45

al,41,45,37,46

al,44,46,40,47

ASEL,S,,,13,16,1,

TYPE, 1

MAT, 1

REAL, 1

ESYS, 0

SECNUM,

SMRT,4

MSHAPE,1,2D

MSHKEY,0

AMESH,ALL

/psymb,esys,1

ASEL,s, , ,13,13,1,

ESLA,S

ENSYM, , , ,ALL,

!reversing

normal

ALLSEL,ALL

APLOT

ASEL,S, , ,15,16,1,

ESLA,S

ENSYM, , , ,ALL,

!reversing

normal

ALLSEL,ALL

APLOT

!*
!*
CM,_NODECM,NODE

CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,3,0.2
MAT,3
MP,EMIS,3,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,0.5,0.5,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,1
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,1
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,2
ASEL,A,,,3
ASEL,A,,,4

```
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,8
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
! Create a pilot node
N,15706, 0,0,0
TSHAP,PILO
E,15706
NSEL,S,,,15706
CM,a,NODE
CMSEL,S,_NODECM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,13
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,15
ASEL,A,,,16
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
```

```
/NUM,1
EPlot
! Reverse target normals
FLST,5,4,5,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
FITEM,5,7
FITEM,5,-8
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
```

```
/NUM,1
EPlot
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!*
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,4,0.1
MAT,4
MP,EMIS,4,7.88860905221e-031
R,4
```

```
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
R,4,,,0.5,0.5,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,5,4,0
KEYOPT,5,5,1
KEYOPT,5,7,0
KEYOPT,5,8,0
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
KEYOPT,5,11,1
KEYOPT,5,12,0
KEYOPT,5,2,0
KEYOPT,4,1,0
KEYOPT,4,2,0
KEYOPT,4,3,0
KEYOPT,4,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,9
ASEL,A,,,10
ASEL,A,,,11
ASEL,A,,,12
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,4,4,-1
TYPE,4
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,13
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,15
ASEL,A,,,16
CM,_CONTACT,AREA
```



```
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,4
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
! Reverse target normals
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,10
FITEM,5,12
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
```

```
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!*
```

CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,3
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN
ESEL,U,ENAME,,169,177
CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
!CNCHECK
CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL
!*
ENORM, 25669
!*

CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,3
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN
ESEL,U,ENAME,,169,177
CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
!CNCHECK
CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL
!*
!*
CM,_CWZ_EL,ELEM

CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,4
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN
ESEL,U,ENAME,,169,177
CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
!CNCHECK
CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL

/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1

```
NSUBST,100,1000,100
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,100
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,15706
!*
/GO
D,P51X,,0.524,,,ROTZ,,,,,
```

```
!/STATUS,SOLU
SOLVE
```

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Rifqi Zufar Saputro dilahirkan di Jakarta, 14 Maret 1995, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dan telah menempuh pendidikan formal di SDN Pondok Bambu 01 Jakarta Timur, kemudian melanjutkan studi di SMPN 255 Jakarta dan SMAN 54 Jakarta. Setelah lulus dari SMA tahun 2012, Penulis diterima menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan nomor registrasi pokok 2712 100 119.

Semasa kuliah penulis aktif berorganisasi menjadi staf divisi olahraga, Badan Semi Otonom Minat dan Bakat HMMT FTI ITS dan Wakil Direktur Badan Semi Otonom Minat dan Bakat HMMT FTI ITS. Penulis juga aktif terlibat dalam kepanitian acara kongres Ikatan Alumni Material ITS. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT Petrokimia Gresik.